



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UPC BARCELONATECH

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Desarrollo de aplicación móvil para el cálculo de pilares metálicos rellenos de hormigón sometidos a flexo-compresión.

Autor: Héctor Posada Cárcamo

Tutor: Rolando Chacón Flores

**Máster en Ingeniería Estructural y de la
Construcción**

Barcelona, Mayo 06 de 2016

AGRADECIMIENTOS

Durante la realización de este proyecto hubo numerosas personas que me acompañaron y me brindaron su apoyo. Quiero agradecer al profesor Rolando Chacón, que en su papel de tutor fue el guía clave para dar sentido y viabilidad a esta investigación, siempre con total disponibilidad y amabilidad.

A mis padres quisiera agradecerles por la oportunidad de cursar este máster y por todo el cariño y apoyo que he recibido por parte de ellos durante toda mi vida, junto con mi hermano por sus buenos consejos y constante presencia a pesar de la distancia.

A mis amigos del máster, los cuales siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en momentos de dificultades, además de hacer que el intercambio de ideas fuese constante, lo que permitió enriquecer el conocimiento adquirido.

Por último, a mis amigos de Colombia, que siempre estuvieron atentos de mi progreso y que con frases de apoyo me ayudaron a progresar en la investigación.

“Queremos ser cerebros iluminados y ardidos por el fuego de su corazón”

- Jorge Eliécer Gaitán.

RESUMEN

Actualmente, las estructuras de grandes y medianos proyectos deben ser lo suficientemente eficientes para encajar en la intensa competitividad que rige en el sector de la construcción. Es por eso que las estructuras mixtas surgen como una alternativa atractiva para los ingenieros civiles, en donde la combinación de acero y hormigón optimizan el diseño aprovechando las mejores propiedades de cada uno de estos materiales.

Esta investigación se enfoca en el estudio de pilas circulares de acero rellenas de hormigón, llamadas CFT por sus iniciales en inglés (Concrete filled tubes). Específicamente el proyecto se desarrolla sobre la resistencia seccional de los elementos CFT sometidos a flexocompresión que no presenten problemas de inestabilidad.

Para contemplar ampliamente el problema estructural de la resistencia seccional de los CFT sometidos a flexocompresión, se tienen en cuenta tres procedimientos. El primer método es el indicado por la norma europea vigente Eurocódigo4 (EN1994) en su apartado 6.7 concerniente a los elementos mixtos, además se incluye el método propuesto por la norma norteamericana AISC360-10 en su apartado I referente al diseño de elementos compuestos. El otro procedimiento tenido en cuenta es el modelo propuesto por Mathias Johansson (Johansson, 2002), el cual expone un modelo de comportamiento para el hormigón y el acero en los CFT que ha tenido gran aceptación y presenta resultados que pueden llegar ser más eficientes que los de la norma europea y norteamericana.

Los procedimientos para el diseño de CFT incluidos en el estudio, se utilizaron para la programación de una aplicación móvil que permite diseñar este tipo de elementos mediante los tres métodos de una forma sencilla y rápida sin la utilización de un ordenador. La aplicación se programó mediante la plataforma en línea App Inventor del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), y es compatible con el sistema operativo Android.

Finalmente múltiples cálculos de diversos elementos CFT se analizan para comparar los métodos incluidos en el estudio y establecer conclusiones acerca de la eficiencia de uno u otro, en donde el modelo de Johansson presenta tendencias que sugieren a este como el método más óptimo.

ABSTRACT

Nowadays, large and medium structural projects must be efficient enough to fit in the intense competitive sector of construction. Therefore, composite structures are an attractive alternative to civil engineers, where the combination of steel and concrete optimize the design taking advantage of the properties of each material.

This research is developed on the study of steel circular concrete filled tubes; generally called CFT (Concrete filled tubes). Specifically, the project is develop about the cross section capacity of CFT elements submitted to combined axial force and bending moment without instability problems.

For a complete view of the structural problem of the cross section capacity of CFT submitted to combined axial force and bending moment, its include on the project three procedures. The first method is the one indicated by the Eurocode4 (EN1994) on its paragraph 6.7 concerning about the calculus of composite members, also is included the method proposed by the North America code AISC360-10 on its paragraph I, referent to the design of composite elements. The other procedure is the model propose by Mathias Johansson in 2002, which expose a behavior model for the concrete and the steel in CFT elements, this model has been well accepted and reach results which could be better that the given by the European and North America codes.

The procedures for the design of CFT included on this research were programmed to develop an app that allows the design of these types of elements through the 3 methods in a simple and fast way without the need of a desktop computer. The app was programmed with the online platform App Inventor of Massachusetts Institute of Technology (MIT), and is compatible with Android.

Finally, multiple calculus of diverse CFT elements were analyzed to compare the methods included on the research and establish conclusions about the efficiency of one or another, where the model presented by Johansson have tendencies that suggest this one as the more optimal.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	15
1.1 Introducción	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivos Principales	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Alcance	17
1.4 Estructura del Documento	18
2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1 Introducción a los CFT	20
2.1.1 Ventajas de los CFT	21
2.1.2 Inconvenientes de los CFT	23
2.2 Uso y aplicación de los CFT	24
2.2.1 Fleet Place House, Londres	24
2.2.2 Peckham Library, Londres	25
2.2.3 Republic Plaza, Singapore	25
2.2.4 Manette Bridge Washington, EEUU	26
2.3 Comportamiento seccional de los CFT	27
2.3.1 Comportamiento del hormigón	27
2.3.2 Comportamiento del acero	29
2.3.3 Comportamiento de la sección mixta	30
2.4 Modelos previos	34
3. MÉTODOS Y MODELOS	41
3.1 Eurocódigo 4 (EC4)	42
3.1.1 Método simplificado de diseño	44

3.1.2 Eurocódigo 4 para CFT Flexocomprimidos	46
3.2 AISC 360 – 10	47
3.3 Modelo propuesto por Johansson	54
3.4 Método iterativo por fibras (cálculo diagrama de interacción seccional N-M)....	58
4. HERRAMIENTAS NUMÉRICAS	67
4.1 App Inventor.....	68
4.1.1 Descripción de la aplicación.....	69
4.1.2 Funcionalidades de la interfaz <i>Diseñador</i>	75
4.1.3 Funcionalidades de la interfaz <i>Bloques</i>	77
4.2 Excel	82
5. OPTIMIZACIÓN, VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS.....	85
5.1 Optimización de diseño	86
5.2 Validación del modelo de Johansson.....	89
5.3 Comparación de métodos y modelos.....	92
6. CONCLUSIONES	103
6.1 Conclusiones relativas a los CFT	104
6.2 Conclusiones relativas a la Aplicación Móvil	104
6.3 Conclusiones relativas a los métodos programados	105
REFERENCIAS	109
ANEJO A – Link de descarga para la aplicación <i>CFT Optimal Design</i>.	113
ANEJO B – Tablas de Resultados	115
ANEJO C – Diagramas de Interacción.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de secciones compuestas. (Perea, 2009)	20
Figura 2 Esquema ilustrativo de los CFT (Concrete Filled Tube) sin refuerzo longitudinal.....	21
Figura 3 Resistencia a compresión de hormigón confinado y no confinado.....	22
Figura 4 Edificio de apartamentos, Montevetro, Londres (Twilt L, Hass R y otros, 2002).....	23
Figura 5 Fleet Place House, London (Twilt L, Hass R y otros, 2002).	24
Figura 6 Peckham Library, Londres (Twilt L, Hass R y otros, 2002).....	25
Figura 7 Construcción, modelo y edificio construido Republic Plaza, Singapore (J M W Brownjohn y otros, 1998).....	26
Figura 8 Manette Bridge, Bremerton, Washington, EEUU (Farley, 2011).....	27
Figura 9 Estados de comportamiento instantáneo para el hormigón bajo carga uniaxial.	28
Figura 10 Comportamiento mecánico del acero en ensayo de tracción.	29
Figura 11 Diferencia entre hormigón confinado y no confinado. (Johansson y Akesson 2002).....	30
Figura 12 Estado de esfuerzos para el núcleo de hormigón y el tubo de acero (Johansson y Akesson 2002).....	31
Figura 13 Modos de abolladura local hipotéticos para tubos de acero circulares sin y con hormigón embebido (Chacón, 2012).	32
Figura 14 Modos de aplicación de carga. (a) En el núcleo de hormigón, (b) En el tubo de acero, (c) Concentrada en toda la sección. (Johansson y Gylltoft 2002).....	33
Figura 15 Comportamiento hormigón confinado y no confinado (Hatzigeorgiu, 2008).....	35
Figura 16 Modelo propuesto para el hormigón confinado (Hatzigeorgiu, 2008).....	35
Figura 17 Diagrama de cuerpo libre para cálculo de <i>frp</i> (Hatzigeorgiu, 2008).....	36
Figura 18 Modelo para el acero considerado (G. Hatzigeorgiu, 2008).	37
Figura 19 Ensayo de los CFT (F-xing Ding y otros 2014).....	38
Figura 20 Esquema de los ensayos de CFT a compresión local (F-xing Ding y otros 2014).....	39
Figura 21 Registro fotográfico de CFT circulares ensayados con diferente área de aplicación de carga (Fu-xing Ding y otros, 2014).	39
Figura 22 Resultados clasificados por geometría y método (experimental, modelo EF y regresión) (Fu-xing Ding y otros 2014).....	40
Figura 23 Tipos de secciones de pilares compuestos según EC4.....	42
Figura 24 Limitación de sección para obviar problemas de pandeo local (EC4).....	43
Figura 25 Aproximación del diagrama de interacción según EC4.....	46
Figura 26 Límite para clasificación de elementos compuestos a compresión según AISC.	48
Figura 27 Límites para clasificación de elementos compuestos a flexión según AISC.	48

Figura 28 Relación entre P_p y P_n (compresión) y relación entre M_p y M_y (flexión) (Lai. Z, 2014).....	51
Figura 29 Diagrama del procedimiento iterativo por fibras (Lai. Z y otros 2014).....	53
Figura 30 Explicación del procedimiento iterativo por fibras (Z.Lai y otros 2014).	53
Figura 31 Deformación libre y restringida del hormigón y el acero (Johansson, 2002). 55	
Figura 32 Diagrama de cuerpo libre del estado tensional de un CFT (Johansson, 2002).	56
Figura 33 Modelo de comportamiento del hormigón confinado utilizado (Johansson, 2002).....	57
Figura 34 Esquema del método de iteración por fibras variando la posición del eje neutro (Chacón y otros 2012)	59
Figura 35 Diagrama de interacción simplificado según Eurocódigo 4 para CFT (Chacón y otros 2012).	59
Figura 36 Primera parte del método iterativo por fibras (valores por debajo del punto C).	60
Figura 37 Área de triángulo para aproximación.	61
Figura 38 Diagrama de interacción (N-M).	62
Figura 39 Área de triángulo para aproximación.	63
Figura 40 Interfaz Diseñador de App Inventor, se crea el espacio gráfico de la aplicación y se añaden los componentes a utilizar en la programación.	68
Figura 41 Interfaz Bloques de App Inventor, se desarrolla la programación del software relacionando los componentes creados en el Diseñador con los respectivos bloques....	69
Figura 42 Esquema de descripción de la aplicación y de cada pantalla programada.	70
Figura 43 (Izquierda) <i>Splash Screen</i> , pantalla de presentación de la aplicación.....	71
Figura 44 (Derecha) Pantalla <i>Info</i> , detalla el alcance de la aplicación y su desarrollador.	71
Figura 45 Pantalla <i>Input</i> , se digitan los datos de entrada del elemento a calcular.	72
Figura 46 Advertencias que enseña la aplicación en caso de que no se cumpla alguna de las restricciones.....	73
Figura 47 Pantalla <i>Output</i> , se calcula el elemento y se presentan los resultados y las consideraciones de diseño que pueden sugerirse dependiendo de los radios de sobreesfuerzo obtenidos.	74
Figura 48 Pantalla <i>Output</i> , cálculo de compresión pura teniendo en cuenta la inestabilidad.....	75
Figura 49 Programación de bloques para la creación de la <i>Splash Screen</i>	77
Figura 50 Uso del componente <i>Notifier</i> , para alertar a los usuarios sobre datos de entrada erróneos.....	78
Figura 51 Uso del componente <i>Tiny DB</i> , trae datos de la pantalla <i>Input</i> para ser utilizados en <i>Output</i>	78
Figura 52 Ejemplo de las herramientas matemáticas en App Inventor.	78
Figura 53 Inicio del comando <i>for</i> , para calcular las iteraciones en cada método.....	79

Figura 54 Uso del componente <i>Canvas</i> , para trazar el diagrama de interacción con sus respectivas escalas.	79
Figura 55 Trazado del eje X correspondiente al Momento.	80
Figura 56 Algoritmo para calcular los radios de sobreesfuerzo.	80
Figura 57 Algoritmo para cambiar el color de la fuente en los radios de sobreesfuerzo y la advertencia de fuerzas de diseño muy grandes para el elemento proyectado.	81
Figura 58 Tabla de elementos evaluados para la comprobación de resultados.	82
Figura 59 Tabla de Radio de resultados entre los calculados por Excel y los calculados por la aplicación móvil.	83
Figura 60 Elementos evaluados para identificar los datos de entrada más eficientes en la optimización.	86
Figura 61 Tabla de incremento en % de la Fuerza Axil y Momento Flector Resistentes para evaluar eficiencia en optimización de diseño.	87
Figura 62 Advertencia al usuario de que las fuerzas de diseño son mucho más altas que las fuerzas resistentes.	88
Figura 63 Recomendación para la optimización del elemento con respecto a la fuerza axial.	88
Figura 64 Recomendación para la optimización del elemento con respecto al momento flector.	89
Figura 65 Validación del modelo de Johansson por medio de resultados experimentales previos.	90
Figura 66 Comparación entre la exactitud de las normas EC4 y AISC360-10 con el modelo de Johansson.	91
Figura 67 Características de elementos evaluados para comparación de métodos y modelos.	93
Figura 68 Tabla para comparación de resultados de fuerza axil.	94
Figura 69 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{EC4}/N_{AISC}).	96
Figura 70 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{EC4}/N_{Joh}).	97
Figura 71 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles ($N_{EC4Conf.}/N_{AISC}$).	97
Figura 72 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles ($N_{EC4Conf.}/N_{Joh}$).	98
Figura 73 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{AISC}/N_{Joh}).	99
Figura 74 Tabla de elementos elegidos para analizar su respectivo diagrama de interacción (M-N)	99
Figura 75 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.	100
Figura 76 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.	100
Figura 77 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.	101
Figura 78 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.	101

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

A medida que el tiempo avanza lo hacen también las construcciones, y la ambición del ser humano exige estructuras más complejas y eficientes. Es por eso que el uso de las estructuras que incluyen elementos compuestos se ha proliferado en la última década, ya que este tipo de elementos combinan las mejores propiedades del acero y el hormigón para obtener la mayor eficiencia de los materiales. De esta realidad surgen las pilas circulares de acero rellenas de hormigón como alternativa para variedades de diseños; cuentan con ventajas como el confinamiento que el tubo de acero le proporciona al hormigón, la restricción que el hormigón ejerce sobre el efecto de abolladura local en el acero, y en cuanto a ventajas constructivas, el tubo de acero puede ser utilizado como encofrado para el hormigón, lo que agiliza tiempos de construcción.

En esta investigación se desarrolla un estudio de tres métodos de diseño de elementos CFT, limitado a la predicción de la capacidad seccional de este tipo de pilas sometidas a flexocompresión y sin problemas de inestabilidad. Los tres procedimientos estudiados son el Eurocódigo4, la norma americana AISC360-10 y un modelo propuesto por Mathias Johansson en el 2002.

Debido a la necesidad de construir diagramas de interacción para predecir la capacidad seccional de los CFT, fue necesario incluir un método iterativo por fibras para todos los procedimientos, teniendo en cuenta las consideraciones específicas para cada método.

Estos tres procedimientos se programaron para desarrollar una aplicación móvil que permite el diseño de los CFT. A partir de los resultados de los cálculos realizados por la aplicación se realiza un análisis comparativo para establecer las conclusiones pertinentes y sugerir que método puede ser el más indicado para la obtención de un diseño óptimo.

La aplicación móvil desarrollada es una herramienta que mediante una sencilla interfaz de usuario se pueden diseñar de manera muy rápida los CFT, brindando la posibilidad a profesionales de la construcción de tener cálculos a la mano en obra y sin mucho gasto computacional ni temporal. Además, es una herramienta de mucha ayuda para los docentes y estudiantes interesados en la investigación de los CFT. La aplicación se diseñó en la plataforma online App Inventor de la universidad MIT, plataforma desarrollada para producir aplicaciones Android (Posada, 2016).

El análisis de resultados obtenidos permite establecer conclusiones acerca de la eficiencia de los tres métodos y sugerir consideraciones de diseño para la optimización de los resultados. El modelo de Johansson se perfila como el método más eficiente y hace cuestionar el modo como la norma europea y norteamericana tratan el diseño de los CFT.

1.2 Objetivos

A continuación se exponen los principales objetivos de esta investigación:

1.2.1 Objetivos Principales

- Desarrollar una aplicación móvil para el diseño de los CFT, que incluya la norma europea, la norteamericana y el modelo propuesto.
- Analizar los resultados de los cálculos realizados por la aplicación móvil para la comparación de los procedimientos incluidos en el estudio que permitan sugerir la utilización de un método pensando en la optimización del diseño.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar el uso de los CFT en diferentes partes del mundo, identificando proyectos que utilicen este tipo de elementos.
- Incluir en el estudio la norma vigente europea y norteamericana para comparación de resultados.
- Establecer y validar un modelo diferente a las normas vigentes que prediga de forma más eficiente la capacidad seccional de los CFT sometidos a flexocompresión.

1.3 Alcance

El desarrollo de esta investigación se centra en las pilas circulares de acero rellenas de hormigón (CFT) sometidas a flexocompresión, no se incluyen este tipo de elementos sometidos a otro estado de esfuerzos. Tampoco se incluyen los CFT que puedan presentar problemas de inestabilidad, los cuales deben ser estudiados con la inclusión de procedimientos que se alejan del concepto de capacidad seccional, para esta restricción se limita el valor de la esbeltez relativa ($\bar{\lambda}$) a no sobrepasar 0.2.

Los elementos CFT a calcular se limitan a hormigones con resistencia a la compresión entre 20 y 60 N/mm² y aceros con límite elástico entre 235 y 460 N/mm², esto con el fin de evitar consideraciones especiales acerca de materiales fuera del rango habitual.

La aplicación móvil es desarrollada en inglés para facilitar la posible proliferación de la misma, esta está dirigida para profesionales, docentes o estudiantes dedicados al diseño o construcción de obras civiles como edificios o puentes. El sistema operativo que soporta la aplicación es Android.

1.4 Estructura del Documento

Esta investigación se desarrolla en 6 capítulos, los cuales se describen detalladamente a continuación:

- **Capítulo 1:** Apartado en donde se introduce la tesina y se realizan apuntes generales de lo que se puede esperar del contenido de esta.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se vislumbran las principales características de los elementos CFT, tales como el uso, la aplicación y el comportamiento seccional. Además se incluyen investigaciones previas que exponen que se ha estudiado sobre el tema y conclusiones que sin duda aportan para el desarrollo de este estudio.
- **Capítulo 3:** Se describen detalladamente los procedimientos elegidos para calcular los CFT, el Eurocódigo4, la norma americana AISC360-10 y el modelo propuesto por Mathias Johansson. Además se explica el método iterativo por fibras que se utiliza para la construcción del diagrama de interacción.
- **Capítulo 4:** Se exponen las herramientas numéricas utilizadas, en este caso la aplicación móvil desde su programación hasta la descripción de su utilización, y el software *Microsoft Excel* que sirvió de apoyo para la programación y la recolección de resultados.
- **Capítulo 5:** Se analizan los resultados compilados de numerosos cálculos realizados de elementos CFT de diversas dimensiones, con el fin de establecer comparaciones y tendencias entre los métodos incluidos en el estudio.
- **Capítulo 6:** Se establecen las conclusiones definitivas de la investigación.

Finamente se exponen las principales referencias utilizadas para la realización de esta investigación y se adjuntan los anejos pertinentes para la mejor comprensión del trabajo final de máster y el link correspondiente para descargar la aplicación *CFT Optimal Design*.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a los CFT

Los sistemas estructurales compuestos son una gran opción cuando en el proyecto se presentan situaciones de cargas muy altas, ó cuando se debe rediseñar la sección por limitaciones específicas ó incremento de cargas. Es por eso que columnas compuestas de secciones con dimensiones y pesos accesibles son una solución viable para reemplazar elementos de hormigón armado de dimensiones muy grandes ó secciones en donde el acero de refuerzo está muy concentrado, lo que dificulta el proceso constructivo. También las secciones compuestas pueden ser usadas como solución a elementos de acero susceptibles a inestabilidad.

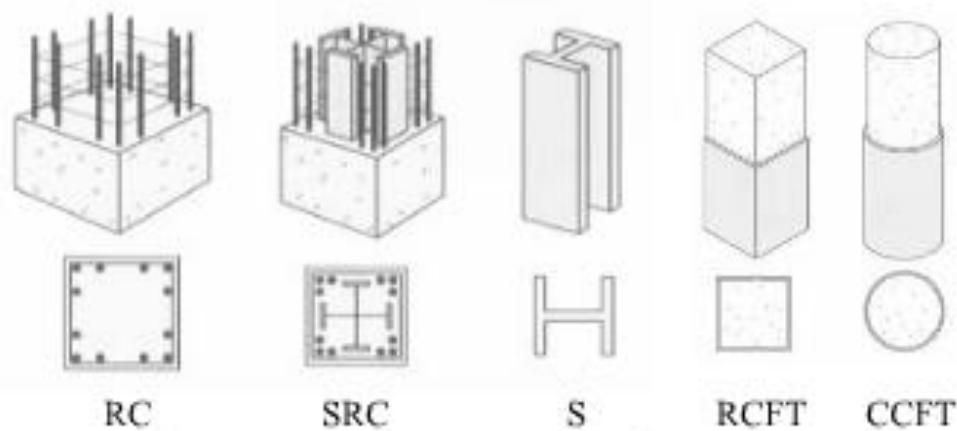


Figura 1 Tipos de secciones compuestas. (Perea, 2009)

Los CFT (Concrete Filled Tubes), es el tipo de sección mixta estructural más eficiente en lo que se refiere a resistencia a compresión. La disponibilidad en el mercado de aceros de alta resistencia hace posible obtener valores importantes de relación de resistencia sobre peso, brindando la posibilidad de obtener soluciones estructurales diversas. Además, los CFT debido a su forma geométrica proporcionan uniformidad a lo largo de la sección, lo que facilita la estandarización para los detalles estructurales de los proyectos.

Mediante el llenado con hormigón de los tubos de acero, se incrementa considerablemente la resistencia a compresión de la sección debido al confinamiento que producen las paredes del tubo de acero, manteniendo de igual forma las ventajas de la sección de acero sin rellenar, incrementando incluso la resistencia al fuego del elemento. Al incrementar la resistencia a compresión, se pueden usar secciones compuestas más pequeñas aportando dinamismo al proceso constructivo y reduciendo el área de pintura de protección contra el fuego.

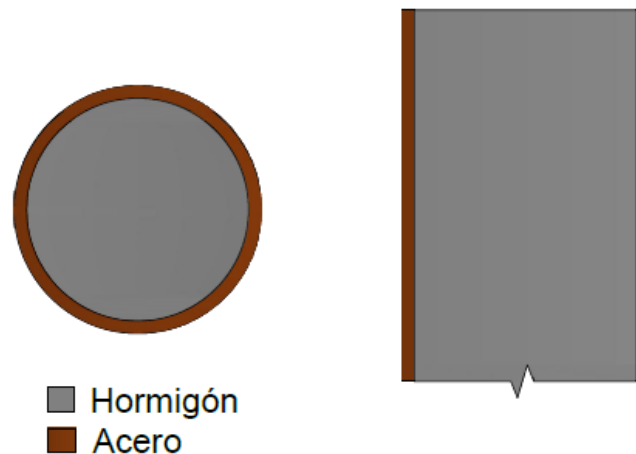


Figura 2 Esquema ilustrativo de los CFT (Concrete Filled Tube) sin refuerzo longitudinal.

El hormigón armado de alta resistencia es muy usado alrededor del mundo, pero cada vez se incrementa la necesidad de reducir las secciones para aprovechar mejor el espacio de construcción. Las secciones con hormigón de alta resistencia se diseñan con una distancia menor entre los estribos para evitar la falla frágil, sin embargo existe un plano de separación entre el hormigón confinado y el hormigón de recubrimiento que no evita que este último pueda fisurarse a edad temprana (Twilt L, Hass R y otros, 2002). En este sentido, se encuentra una muy buena razón para utilizar los CFT en vez del hormigón armado tradicional, ya que es factible utilizar hormigón de alta resistencia que puede llevarse a una rotura dúctil mediante el encasamiento del tubo de acero.

Los tubos de acero circulares rellenos de hormigón pueden ser utilizados con refuerzo longitudinal dentro del hormigón o sin estos, en este estudio se contemplarán aquellos que no poseen refuerzo longitudinal, ya que en la mayoría de los casos se utiliza refuerzo adicional para la protección contra el fuego. Cuando el elemento se encuentra sometido a altas temperaturas el acero del tubo se funde, mientras que el acero de refuerzo puede mantenerse por más tiempo haciendo que el elemento resista por más tiempo la acción del incendio (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

2.1.1 Ventajas de los CFT

A continuación se detallan las ventajas que puede proporcionar el uso de los tubos de acero rellenos de hormigón:

- Confinamiento del hormigón: El tubo de acero proporciona una camisa que envuelve al hormigón, cuando este trata de expandirse volumétricamente debido a la acción de una carga, el acero no lo permite, situación que incrementa la carga de rotura y produce una falla más dúctil. En este sentido, la sección alcanza mayor resistencia a compresión lo que genera la posibilidad de producir diseños más eficientes.

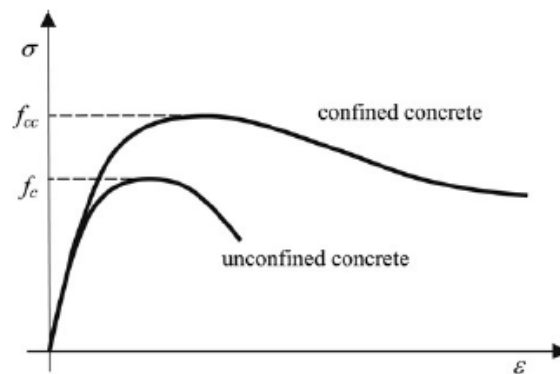


Fig. 1. Confinement of concrete.

Figura 3 Resistencia a compresión de hormigón confinado y no confinado.

- Disminución de inestabilidad: El hormigón aporta estabilidad al elemento y restringe las deformaciones del acero por pandeo o abolladura local, facilitando el uso de secciones esbeltas con gran resistencia a compresión.
- Proceso constructivo: El tubo de acero también sirve como encofrado para el vertimiento del hormigón, reduciendo tiempos y costes de ejecución, alcanzando resistencias iniciales más altas que permiten acelerar las actividades de la construcción en general.
- Uniones y conexiones: Debido a la uniformidad de la geometría, y al ser las paredes externas de acero, las uniones se pueden estandarizar fácilmente y su ejecución no es compleja como en otro tipo de secciones compuestas.
- Resistencia al fuego: La resistencia al fuego para las secciones de acero siempre ha sido un inconveniente, al estar el tubo de acero en contacto con el núcleo de hormigón, se genera una transferencia de calor que incrementa el tiempo de la fundición del acero, haciendo que la estructura sea más segura contra posibles incendios.
- Estética: Para muchos arquitectos y diseñadores la forma de los CFT es más agradable para la vista y se pueden crear espacios amplios con alturas importantes, lo que genera aprovechamiento de la luz y comodidad para su funcionalidad.



Figura 4 Edificio de apartamentos, Montevetro, Londres (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

Varias de estas ventajas ya eran conocidas mucho tiempo atrás, de hecho la primera patente relacionada con los tubos de acero rellenos de hormigón data del año 1898, sin embargo el uso de los CFT no se expandió hasta la mitad del siglo XX, en donde los resultados de estudios y experiencias previas los ratificaron como una buena solución estructural, además el crecimiento de la industria hizo que fuera posible encontrar gran variedad de tubos de acero con resistencias más altas.

2.1.2 Inconvenientes de los CFT

Los siguientes puntos deben ser de cuidado a la hora de trabajar con tubos circulares de acero rellenos de hormigón:

- Adherencia de materiales: Para que el efecto de confinamiento y ductilidad entre el hormigón y el acero se pueda desarrollar sin inconvenientes, debe asegurarse una adherencia que genere suficiente rozamiento.
- Inestabilidad: Los CFT dependen mucho de su esbeltez, elementos muy largos con diámetros pequeños generan problemas de inestabilidad global y efectos de segundo orden, lo que dificulta el cálculo de las resistencias y limita las ventajas que en otras condiciones si pueden desarrollar.
- Norma vigente: Aunque en diferentes normativas se encuentra el cálculo de los CFT, este no es muy exhaustivo y estudios han demostrado que algunas secciones (columnas cortas), pueden desarrollar resistencias mayores que las calculadas mediante los códigos establecidos.

2.2 Uso y aplicación de los CFT

El uso de los pilares de sección circular hueca rellena de hormigón se ha extendido por todo el mundo últimamente; se utilizan para la construcción de edificios de baja y gran altura, además se emplean para pilas de puentes.

A continuación se presentan diversas construcciones alrededor del mundo en donde se han utilizado este tipo de elementos.

2.2.1 Fleet Place House, Londres

Se trata de un edificio de oficinas de 8 pisos de altura, en donde se emplearon los CFT externamente en cada una de las caras longitudinales del edificio, de esta manera se aumentó el espacio libre en el interior del recinto. Para apoyarse en los cimientos existentes, los CFT se unen a nivel de suelo concentrando la carga que proviene de estos.



Figura 5 Fleet Place House, London (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

Las columnas tienen un diámetro externo constante de 323.9mm, sin embargo el espesor del tubo de acero varía de 30mm en la primera planta, 16mm entre la segunda y quinta planta y 12.5mm entre la sexta y séptima planta, con un tipo de acero S355J. El tiempo de incendio requerido para los elementos internos es generalmente de 2 horas, sin embargo para elementos externos es sólo de 45 minutos, por lo tanto sólo con el llenado de los tubos con hormigón se alcanza este requisito, en consecuencia no se utilizó pintura de protección contra incendios. El hormigón utilizado varía de 40 a 60 MPa dependiendo la magnitud de las cargas verticales (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

El cliente fue Heron Property Corporation, el arquitecto Skidmore, Orwings and Merrill y el ingeniero estructural fue Waterman Partnership.

2.2.2 Peckham Library, Londres

Esta librería posee una arquitectura muy curiosa e inusual, en el frente es soportada por CFT, dispuestos de forma peculiar con ángulo de inclinación para aportar a una fachada irregular. En total son 7 columnas de 18 metros de largo, alcanzando un radio de altura sobre ancho de 37, estas columnas tan largas pueden presentar problemas de inestabilidad por lo que un cálculo profundo debe ser aplicado, sin embargo es prueba de que este tipo de elementos pueden ser solución en diversos tipos de construcción. La inclinación de las columnas aporta rigidez en contra de las cargas laterales y limita el desarrollo del momento de flexión.



Figura 6 Peckham Library, Londres (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

Las columnas se componen de secciones CFT de diámetro exterior 323.9mm, y varían en espesor entre 20 y 16mm. En esta construcción si se empleó refuerzo longitudinal, el cual consiste principalmente en 8 barras de 12mm de diámetro, el acero empleado fue de tipo S355J. Las columnas se rellenaron de hormigón para aumentar su resistencia a compresión y satisfacer los requerimientos contra incendios (Twilt L, Hass R y otros, 2002).

El cliente de este proyecto fue London Borough of Southwark, la empresa de arquitectura fue Alsop Architects y el ingeniero estructural Adams, Kara, Taylor.

2.2.3 Republic Plaza, Singapore

Este edificio se encuentra entre los más altos de Singapore, mide 280 metros que contemplan 66 plantas. Su estructura se comprende en un núcleo de hormigón acompañado de un sistema aporticado cuyas columnas son elementos CFT. Su

construcción se realizó en tan sólo 2 años, lo que confirma la aceleración en la construcción gracias al uso de los tubos circulares huecos rellenos de hormigón.



Figura 7 Construcción, modelo y edificio construido Republic Plaza, Singapore (J M W Brownjohn y otros, 1998).

El sistema aporticado de columnas circulares huecas de acero rellenas de hormigón sólo se encuentra en el exterior de la estructura, con el propósito de resistir altas cargas laterales producidas por el viento ó aceleraciones sísmicas, ya que el elemento principal de soporte es el núcleo de hormigón armado (Emporis Research, 2015).

El cliente fue City Developments Limited, el arquitecto Kisho Kurokawa y la empresa de ingeniería estructural fue RSP Architects Planners and Engineers.

2.2.4 Manette Bridge Washington, EEUU

Los CFT también pueden ser usados en puentes, uno de las maneras de emplear este tipo de elementos son las pilas metálicas tubulares circulares rellenas de hormigón, en donde el peso del tablero recae sobre los CFT y este debido a sus propiedades de alta resistencia a la compresión puede perfectamente asumir las solicitaciones demandadas y transmitirlas al suelo. A continuación se aprecia el uso de los tubos de acero circulares huecos rellenos de hormigón para el Manette Bridge en EEUU (Bremerton, Washington).



Figura 8 Manette Bridge, Bremerton, Washington, EEUU (Farley, 2011)

Esta construcción comprende la remodelación de un puente hecho hace mas de 80 años, por lo que era necesario construir uno nuevo con tecnología y especificaciones actuales. Los tubos de acero tienen un diámetro de 12 pies y contienen refuerzo longitudinal en el núcleo de hormigón (Farley, 2011).

La constructora encargada fue Manson Construction, la cual tardó en construir el puente de Agosto de 2010 a Febrero de 2012 (1 año y medio). El puente pertenece al departamento de transporte del estado de Washington.

2.3 Comportamiento seccional de los CFT

Antes de empezar a estudiar los métodos de cálculo para la predicción de la capacidad de los tubos huecos circulares de acero rellenos de hormigón, es necesario comprender el comportamiento seccional de estos. El hormigón y el acero tienen un comportamiento muy diferente al que presentan en secciones de hormigón armado, y existen efectos y fenómenos que intervienen directamente en la capacidad del elemento y por lo tanto en el diseño de este.

2.3.1 Comportamiento del hormigón

Hablar del comportamiento del hormigón es un término muy general, existen diferentes factores que modifican este comportamiento, como lo son la aplicación de la carga y la edad de estudio. Para la explicación de las propiedades básicas del hormigón se enfatiza en el comportamiento bajo carga uniaxial y efectos instantáneos.

La gráfica de tensión – deformación muestra claramente cómo se comporta el hormigón a diferentes niveles de carga. Es posible dividir la gráfica de la Figura 9 en tres estados de comportamiento fundamentales dependiendo la magnitud de la carga aplicada:

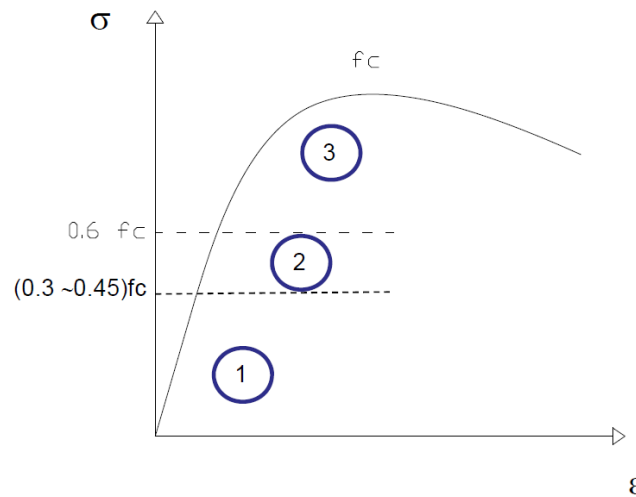


Figura 9 Estados de comportamiento instantáneo para el hormigón bajo carga uniaxial.

- Estado de comportamiento 1: En esta parte el comportamiento del hormigón se puede considerar prácticamente lineal – elástico y la curva tensión – deformación es cuasi-lineal. Se presentan sólo microfisuras causadas por la expansión térmica y la retracción.
- Estado de comportamiento 2: Aquí, el hormigón se empieza a microfisurar en compresión, sin embargo no es apreciable a simple vista. Esta microfisuración inicia en la interface árido-pasta debido a la acumulación de tensiones por parte del árido al poseer mayor módulo elástico. La microfisuración aún es estable pero se inicia el comportamiento no lineal tensión – deformación.
- Estado de comportamiento 3: En este último estado, se inician fisuraciones que se pueden apreciar a simple vista, ya que estas se propagan por medio de la pasta de cemento en dirección cuasi-paralela a las cargas aplicadas, y ya no sólo en los contornos de contacto árido-pasta. La deformación lateral aumenta considerablemente y al alcanzar la resistencia máxima las grietas se propagan de manera descontrolada.

El comportamiento del hormigón a tracción ha sido ampliamente estudiado, su resistencia a este tipo de esfuerzo es baja y varios modelos lo plantean como un comportamiento lineal hasta que alcanza la resistencia máxima a tensión e inicia la

propagación de grietas descontroladamente. La siguiente fórmula extraída del Eurocódigo2 (EN1992), expresa una relación aproximada entre la resistencia a tensión y compresión del hormigón.

$$f't = 0.3^3 \sqrt{f'c^2} \quad (2.1)$$

2.3.2 Comportamiento del acero

El acero debido a su homogeneidad como material, presenta un comportamiento mecánico ampliamente estudiado. En lo que se refiere a la gráfica tensión - deformación, el acero se comporta de igual manera si se esfuerza en compresión o en tensión, a diferencia del hormigón que posee características significativas a compresión y muy pobres a tensión. El ensayo a tracción de probetas normalizadas muestra claramente el comportamiento que desarrolla el acero desde el inicio de carga hasta llegar a la rotura.

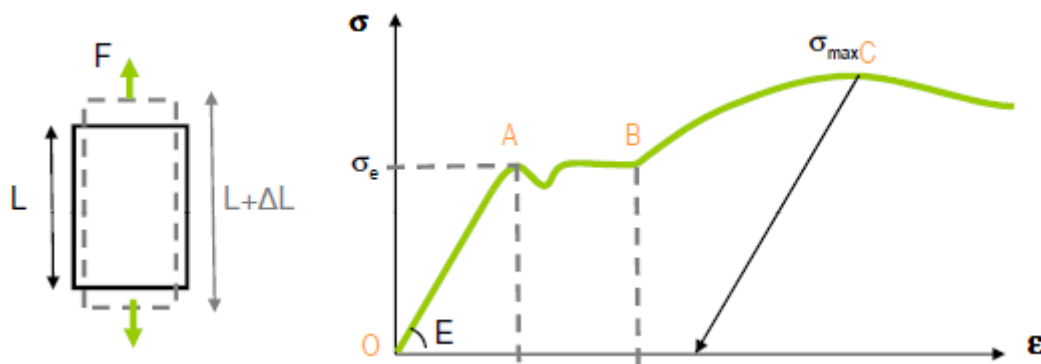


Figura 10 Comportamiento mecánico del acero en ensayo de tracción.

- **Zona A:** En esta zona el acero presenta un comportamiento lineal en donde se cumple la ley de Hooke. Además las fibras tienen la capacidad de volver a su estado inicial sin presentar deformaciones luego de cesar la aplicación de carga. La carga unitaria en donde finaliza esta parte lineal del comportamiento del acero se conoce como límite de fluencia (f_y), valor de referencia para procedimientos de diseño.
- **Zona B:** Si se carga un poco más allá del límite elástico, se entra en esta zona en donde las deformaciones crecen rápidamente sin aumentar la magnitud de la carga. La plastificación se inicia y al cesar la aplicación de la carga sólo se recupera parte de las deformaciones en una recta con pendiente E (módulo elástico del acero), quedando sólo deformaciones plásticas irreversibles.

- Zona C: Luego del punto B se inicia la zona de endurecimiento por deformación, aquí se puede llegar hasta la carga máxima a tracción pero presentando deformaciones importantes. Alcanzada la carga máxima la sección pierde área transversal (estricción) y se llega hasta la rotura alcanzando entre 18 a 20% de deformación remanente.

En el caso en donde se requiera estudiar el acero en un estado de carga multiaxial, en su rango elástico (Zona A), se puede aplicar la ley de Hooke en tres dimensiones estableciendo un mecanismo de fallo mediante el criterio de Von Mises.

2.3.3 Comportamiento de la sección mixta

En las columnas CFT, el tubo de acero encierra el núcleo de hormigón y se considera que actúa como refuerzo longitudinal y transversal. En este sentido, la sección de acero se ve sometida a esfuerzo longitudinal de compresión y tensión circunferencial, lo que afecta el comportamiento mecánico del CFT y se generan efectos que hacen que no se pueda considerar la sección como la suma de las capacidades de cada material, la interacción entre ellos genera comportamientos que intervienen directamente en la capacidad final de la sección mixta.

- Confinamiento: Una de las características más importantes de los CFT, es el hecho de que el tubo de acero causa un efecto de confinamiento en el hormigón aumentando su resistencia considerablemente. Este efecto se produce gracias a que el hormigón cuando alcanza alrededor del 60% de su resistencia empieza a deformarse lateralmente, sin embargo las paredes del tubo de acero impiden esta deformación llevando al hormigón a poder desarrollar por más tiempo su resistencia hasta llegar a una falla dúctil, cualidad muy importante para el uso de hormigón de alta resistencia.

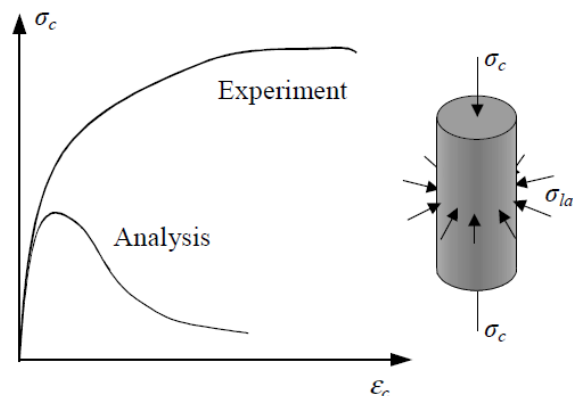


Figura 11 Diferencia entre hormigón confinado y no confinado. (Johansson y Akesson 2002).

El tipo de confinamiento que se produce es pasivo, ya que la presión de confinamiento no es constante como ocurre en el confinamiento activo, sin embargo estudios anteriores han determinado que el comportamiento del hormigón no depende significativamente del tipo de confinamiento al que se ve sometido. El efecto de confinamiento pasivo también depende de la deformación lateral del hormigón y de la relación de tensión – deformación del tipo de acero del tubo (Johansson y Akesson, 2002).

Al someter un CFT a una carga concentrada, el coeficiente de Poisson juega un papel muy importante, ya que al inicio de la aplicación de la carga el acero se deforma lateralmente más rápido que el hormigón debido a que su coeficiente de Poisson es más alto, imposibilitando el efecto de confinamiento; al incrementar la carga el hormigón se empieza a plastificar hasta alcanzar las deformaciones laterales del tubo de acero. Si se continúa aumentando la carga, el acero restringe la deformación lateral del núcleo de hormigón y pasa a estar cargado de manera triaxial, mientras que el acero entra estado biaxial (Johansson y Gylltoft, 2002).

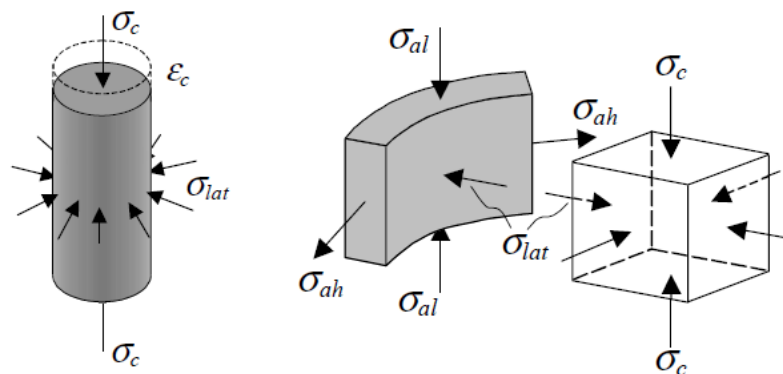


Figura 12 Estado de esfuerzos para el núcleo de hormigón y el tubo de acero (Johansson y Akesson 2002).

El estado tensional mostrado en la Figura 12 ha sido utilizado por varios investigadores para formular predicciones para la capacidad de los tubos circulares huecos rellenos de hormigón al igualar los esfuerzos circunferenciales con los esfuerzos internos.

- **Abolladura local:** Es sabido que uno de los beneficios de los tubos de acero circulares huecos rellenos de hormigón es la capacidad de retardar el fenómeno de abolladura local, el cual consiste en la falla de una sección de acero debido a tensiones longitudinales bajo cargas menores al límite elástico.

La reducción del problema de abolladura local en los CFT se produce gracias a que el núcleo de hormigón impide que el acero pueda desarrollar fallas hacia el sentido interior de la sección. Para mayor ilustración en la Figura 13 se observan dos secciones representativas de tubos circulares de acero, uno se encuentra

hueco y el otro relleno de hormigón, se aprecia claramente que en el tubo con hormigón embebido no existe componente que pueda producir una abolladura local en el sentido interior, por lo tanto sólo se puede producir hacia afuera de la sección.

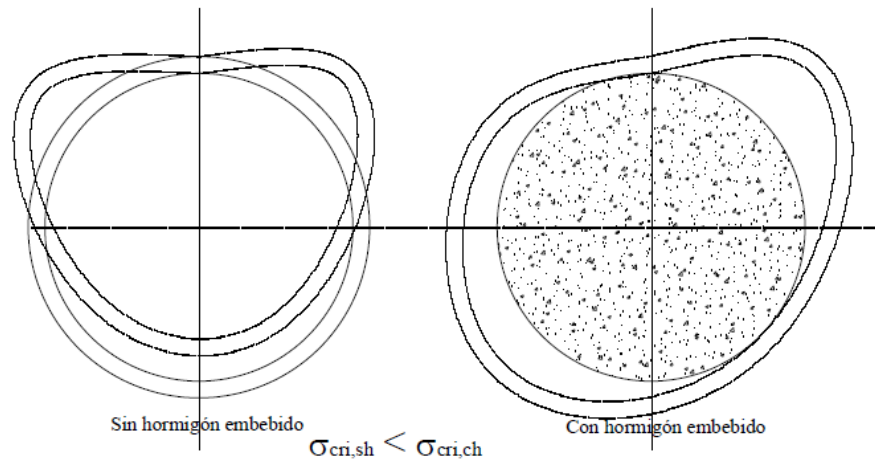


Figura 13 Modos de abolladura local hipotéticos para tubos de acero circulares sin y con hormigón embebido (Chacón, 2012).

Es de inmensa importancia aclarar que este retraso de falla por abolladura local no se alcanza en todas las secciones CFT, la relación diámetro entre espesor del tubo de acero (D/t) es fundamental para saber si se puede asumir esta condición o no. Para altas relaciones D/t la abolladura local se puede alcanzar en el rango elástico de la sección sin llegar a agotar esta, mientras que para elementos con relaciones D/t y longitudes menores la aparición de la abolladura local se encuentra por encima de la resistencia seccional del elemento permitiendo despreciar el efecto de abolladura local y aumentar su capacidad considerablemente (Chacón, 2012).

Las normas europeas y americanas establecen límites para las relaciones D/t que permiten diseñar los CFT en rangos que establecen la inclusión o no del problema de inestabilidad por abolladura local.

- Aplicación de la carga: El comportamiento seccional de la sección mixta de tubos de acero circulares huecos rellenos de hormigón, depende directamente del modo en que se aplique la carga. En términos de carga axial, esta puede ser aplicada concentrada en toda la sección, cargada solamente en el núcleo de hormigón y cargada solamente en el tubo de acero (Ver Figura 14).

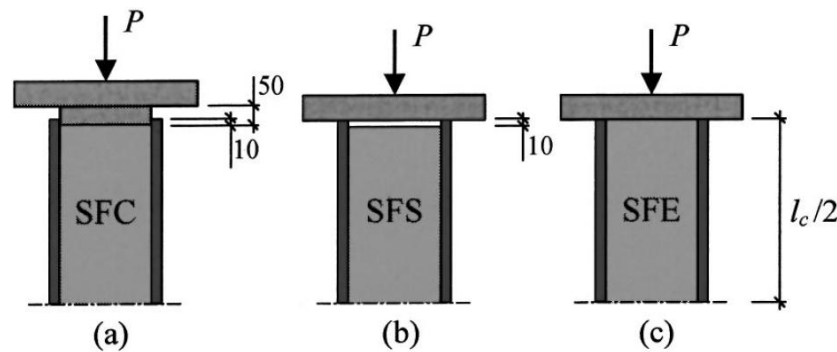


Figura 14 Modos de aplicación de carga. (a) En el núcleo de hormigón, (b) En el tubo de acero, (c) Concentrada en toda la sección. (Johansson y Gylltoft 2002).

Johansson y Gylltoft (2002) realizaron diferentes experimentos de carga con los tres modos de aplicación, concluyen que si la carga es aplicada en toda la sección o sólo en la sección de hormigón, la estabilidad del elemento se pierde por la combinación de pandeo local y aplastamiento, y con la carga aplicada sólo al tubo de acero, la abolladura local sólo se desarrolla hacia afuera.

También anotaron que en los CFT con la carga aplicada en toda la sección o en la sección de hormigón, el núcleo de hormigón incrementa significativamente su resistencia debido al efecto de confinamiento. Además si se considera rozamiento natural entre el hormigón y el tubo de acero y se aplica la carga sólo al núcleo de hormigón, el incremento de resistencia del hormigón debido al confinamiento es más elevado. Esto no indica que la mejor manera de aplicar los CFT es con la carga aplicada en el núcleo de hormigón, ya que no es confiable contar sólo con la fuerza de rozamiento natural que se pueda producir, y es mejor forzar la sección a deformaciones similares para asegurar la compatibilidad de los esfuerzos, condición que se logra con la carga aplicada en toda la sección.

- Fuerza de rozamiento: Otro punto clave en el comportamiento de los CFT, es el hecho de que la fuerza de rozamiento entre el hormigón y el acero debe ser tal que pueda producir los efectos de la acción compuesta, por lo tanto se cree que esta fuerza de rozamiento tiene un efecto significativo en el comportamiento de los CFT, sin embargo es un campo en el que se requieren más estudios.

Johansson y Gylltoft (2002) variaron los coeficientes de rozamiento en varias pruebas experimentales y demostraron que en este efecto de rozamiento influye; la forma de aplicación de la carga, el efecto de confinamiento y la rigidez de las paredes del tubo de acero a presiones perpendiculares a su plano. En este estudio, estos investigadores también anotaron que la carga aplicada se redistribuye entre el núcleo de hormigón y el tubo de acero, por lo tanto la transferencia de carga entre los materiales debe ocurrir en la superficie de contacto. haciendo que la fuerza de rozamiento intervenga en el comportamiento

seccional, sin embargo la aplicación de la carga debe ser concentrada sólo en el núcleo de hormigón, de otro modo los efectos por rozamiento entre hormigón y acero son mínimos y despreciables. En este sentido, si la carga es aplicada en toda la sección o en la sección de acero, la fuerza de rozamiento representa poca importancia en el comportamiento mecánico de la sección (Johansson y Gylltoft 2002).

2.4 Modelos previos

Modelo propuesto por Hatzigeorgiu

Dentro de los estudios previos que se han realizado sobre los CFT se encuentra el realizado por George Hatzigeorgiu (2008). En este estudio el autor establece que los métodos de las normas ACI y AISC toman diferentes caminos para calcular la resistencia seccional de un CFT; mientras que el ACI trata al elemento como una columna reforzada ordinaria, el AISC va un poco más allá y modifica las propiedades regulares de los materiales asumiendo una columna de acero utilizando las modificaciones estratégicas. El trato que le dan estas normas al cálculo de los CFT es incompleto y Hatzigeorgiu afirma que existe un incremento considerable de la resistencia a compresión del hormigón debido al efecto de confinamiento proporcionado por las paredes del tubo de acero.

Entrando más en detalle en este estudio previo, Hatzigeorgiu propone un método simple para el cálculo de capacidad seccional que tiene en cuenta el efecto de confinamiento, fenómeno que incrementa la ductilidad y la resistencia del hormigón considerablemente, y a su vez el acero reduce su límite elástico. Para tener en cuenta los efectos antes mencionados es necesario proponer un modelo de comportamiento esfuerzo-deformación para el hormigón y para el acero que puedan ser aplicados posteriormente en el cálculo de resistencia seccional del elemento.

Modelo del hormigón

Como se ha dicho anteriormente, el hormigón confinado por el tubo de acero se comporta de manera diferente e incrementa sus resistencia a compresión y su ductilidad gracias al estado de esfuerzo triaxial en el que se encuentra, situación que no puede ser ajena al cálculo de los CFT.

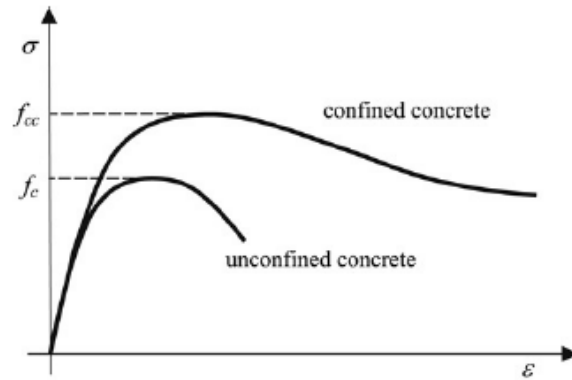


Figura 15 Comportamiento hormigón confinado y no confinado (Hatzigeorgiu, 2008).

Como se observa en la Figura 15, efectivamente el hormigón confinado aumenta considerablemente su resistencia y ductilidad, logrando rotura a una carga mayor y de una forma menos súbita. Empíricamente es posible construir estas gráficas mediante ensayos de carga, sin embargo la idea de Hatzigeorgiu es llegar a un método numérico simple que se pueda aplicar generalmente para calcular la resistencia de los CFT, es por eso que asume un modelo para el hormigón confinado que permita encontrar fórmulas generales.

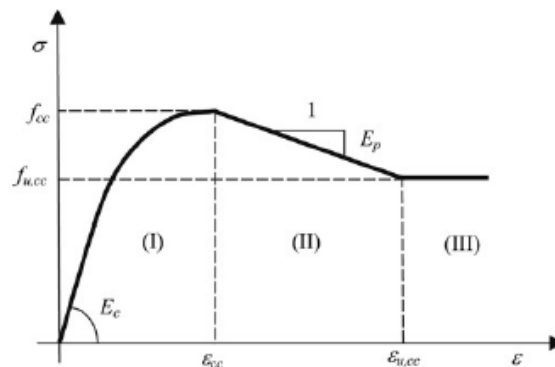


Figura 16 Modelo propuesto para el hormigón confinado (Hatzigeorgiu, 2008).

Se observa en la Figura 16 que la gráfica de esfuerzo-deformación se contempla en tres regiones, de las cuales la región I es la que permite hallar la resistencia a compresión del hormigón confinado (f_{cc}), propiedad fundamental para el cálculo de resistencia seccional. Para construir la región I Hatzigeorgiu propone una ecuación cúbica que representa 3 parámetros A, B y C relacionados con la resistencia a compresión del hormigón confinado (f_{cc}), su correspondiente deformación (ϵ_{cc}) y el módulo de elasticidad inicial (E_c). Todos estos parámetros se calculan en relación a estados de fuerza uniaxiales.

$$\sigma = A\epsilon + B\epsilon^2 + C\epsilon^3 \quad (2.2)$$

Para calcular la f_{cc} , es necesario calcular el esfuerzo de confinamiento (f_{rp}) acompañado de un factor k de confinamiento, el cual el autor ha tomado 4.3 a partir de un análisis de regresión de resultados experimentales. El f_{rp} se calcula a partir de un diagrama de cuerpo libre, en donde se equilibra la tensión del acero horizontal y el esfuerzo de confinamiento.

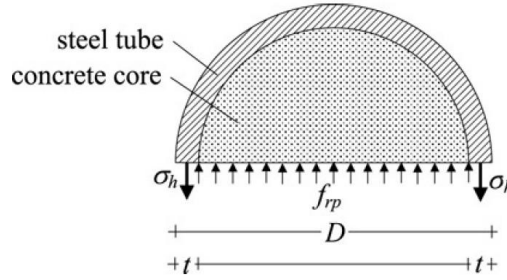


Figura 17 Diagrama de cuerpo libre para cálculo de f_{rp} (Hatzigeorgiu, 2008).

De la Figura 17, es posible obtener f_{rp} fácilmente, sin embargo es necesario primero calcular la tensión horizontal en el acero (σ_h), esta tensión es fundamental para el cálculo ya que afecta tanto el comportamiento del acero como el del hormigón. El autor plantea una normalización empírica de f_y/σ_h , de donde se puede obtener una fórmula final para la tensión del acero horizontal. Explicados los parámetros necesarios, se utilizan las siguientes fórmulas para construir la región I del modelo del hormigón propuesto por el autor.

$$\frac{\sigma_h}{f_y} = e^{\left[\ln\left(\frac{D}{t}\right) + \ln(f_y) - 11\right]} \leq 1.0 \quad (2.3)$$

$$\sigma_h = f_y * e^{\left[\ln\left(\frac{D}{t}\right) + \ln(f_y) - 11\right]} \quad (2.4)$$

$$f_{rp} = \frac{2\sigma_h * t}{D - 2t} \quad (2.5)$$

$$f_{cc} = f_c + k * f_{rp} \quad \text{Donde, } k = 4.3 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.0022 \frac{f_{cc}}{f_c} \quad (2.7)$$

$$E_c = 600f_c \quad (2.8)$$

$$A = E_c \quad (2.9)$$

$$B = \frac{3f_{cc} - 2E_c * \varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{cc}^2} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{E_c * \varepsilon_{cc} - 2f_{cc}}{\varepsilon_{cc}^2} \quad (2.11)$$

Detallado el modelo de comportamiento del hormigón propuesto por Hatzigeorgiu, queda agregar que sólo se tiene en cuenta el cálculo de f_{cc} , ya que es el valor que se necesita para incluir posteriormente en el cálculo seccional de los CFT.

Modelo del acero

Para el acero, Hatzigeorgiu recurre al criterio de Von Misses, este se plantea en estado tensional biaxial, compuestos por las tensiones verticales y horizontales que se generan en el acero. El endurecimiento se tiene en cuenta, y el modulo de elasticidad secundario (E_h) se asume igual para el límite elástico a compresión y tracción.

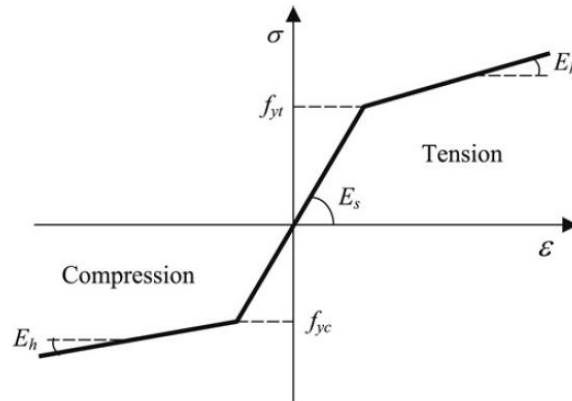


Figura 18 Modelo para el acero considerado (G. Hatzigeorgiu, 2008).

Teniendo en cuenta el modelo de acero adoptado por el autor, el criterio de Von Misses y el límite elástico a compresión y tensión del acero viene dado por las siguientes fórmulas:

$$\sigma_v^2 + \sigma_h^2 - \sigma_v * \sigma_h = f_y^2 \quad (2.12)$$

$$f_{yt} = 0.5(\sigma_h + \sqrt{4f_y^2 - 3\sigma_h^2}) \quad (2.13)$$

$$f_{yc} = 0.5(\sigma_h - \sqrt{4f_y^2 - 3\sigma_h^2}) \quad (2.14)$$

De las anteriores fórmulas, se concluye que para una tensión horizontal en el acero mayor a 0, el límite elástico a tensión (f_{yt}), es mayor o igual a f_y , mientras que el límite elástico a compresión (f_{yc}), tomando valores absolutos, es menor que f_y . Cabe aclarar que para el cálculo de la resistencia seccional de los CFT, sólo se utiliza el valor de f_{yc} , ya que a compresión es cuando ocurre el fenómeno de reducción del límite elástico del acero debido al esfuerzo por confinamiento que produce en el hormigón, situación que se presenta sólo en las fibras comprimidas de la sección de acero.

Modelo propuesto por Fa-xing Ding

En este estudio Fa-xing Ding y otros (2014), exponen que en los últimos años el uso de los tubos de acero circulares huecos rellenos de hormigón se ha extendido por todo el mundo en proyectos como edificios de gran altura y puentes. Es por eso que decidieron realizar ensayos de columnas cortas CFT con forma rectangular y circular, específicamente 12 y 8 especímenes respectivamente. Cabe destacar que el estudio se centró en la aplicación de carga a compresión local, situación que no ha sido ampliamente estudiada y los códigos existentes no abarcan completamente esta condición.

La investigación se focaliza en estudiar el comportamiento de las columnas cortas CFT bajo la acción de compresión local, realizando una comparación entre los resultados de los elementos ensayados y un modelo de elementos finitos propuestos, el cual presentó afinidad con los resultados experimentales. Luego de verificar el modelo de elementos finitos propusieron un método simplificado para predecir la capacidad de los CFT bajo compresión local, mediante una aproximación por análisis de regresión.

Para los elementos circulares, ensayaron 12 especímenes de 300mm de diámetro, 4mm de espesor y 900mm de longitud. Los hormigones utilizados para estos ensayos tenían una resistencia última a compresión de 35.5MPa para 6 CFT y de 54.4MPa para los 6 restantes, mientras que todos los tubos de acero tienen límite de fluencia de 311MPa.

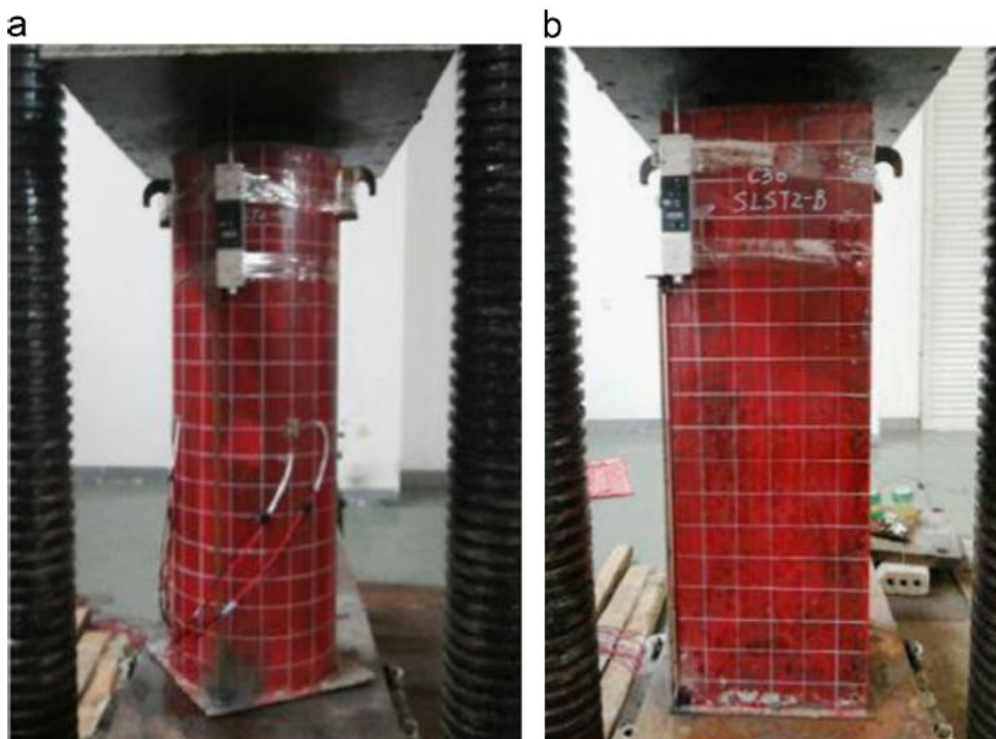


Figura 19 Ensayo de los CFT (F-xing Ding y otros 2014).

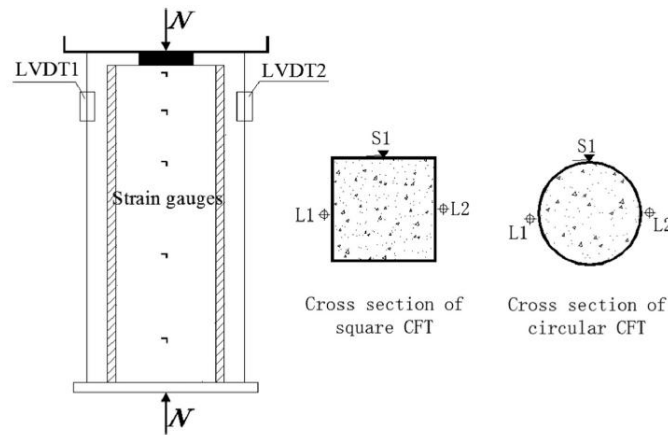


Figura 20 Esquema de los ensayos de CFT a compresión local (F-xing Ding y otros 2014).

En la las Figuras 19 y 20 se aprecia el modo en que son cargadas las columnas cortas CFT, no se aplica una carga concentrada en toda la sección, se aplica una cargada concéntrica en el núcleo de hormigón, lo que genera diferentes deformaciones longitudinales entre el acero y el hormigón. De este estado de carga se define un parámetro β que consiste en la relación entre el área transversal sometida a compresión y el área de la sección transversal del elemento. Este parámetro fue variado entre los ensayos, incluso se ensayaron columnas cortas CFT con $\beta=1.00$, lo que implica un CFT sometido a una carga concentrada en toda la sección transversal. A continuación en la Figura 21 se observan las diferentes formas de falla que se produjeron con diferentes aplicaciones de carga axial:



Figura 21 Registro fotográfico de CFT circulares ensayados con diferente área de aplicación de carga (Fu-xing Ding y otros, 2014).

La diferencia entre las formas de falla dependiendo del área de aplicación de carga axial es evidente, esto se ve reflejado en la tabla de resultados expuesta por Fu-xing Ding, en donde a medida que se incrementa el parámetro β , la capacidad última axial de los elementos aumenta considerablemente, con $\beta=0.11$ se alcanzó una carga última a compresión de 1900KN, mientras que con $\beta=1.00$ se llegó a una carga última a compresión de 4976KN, más del doble.

No.	Section type	Specimen label	$B(D) \times t \times L$ mm	$b(d)$ mm	f_{yl} MPa	f_{cu} MPa	β	$N_{b,el}$ kN	$N_{b,FE}$ kN	$N_{b,t}$ kN
1	Circular	CLST1-A	$300 \times 3.72 \times 900$	100	311	35.5	0.11	1880	1630	1908
2		CLST1-B	$300 \times 3.76 \times 900$	100	311	35.5	0.11	1900	1638	1922
3		CLST2-A	$300 \times 3.70 \times 900$	200	311	35.5	0.44	3310	2758	2856
4		CLST2-B	$300 \times 3.68 \times 900$	200	311	35.5	0.44	3200	2750	2848
5		C1-A	$300 \times 3.70 \times 900$	300	311	35.5	1.00	3780	3757	3625
6		C1-B	$300 \times 3.71 \times 900$	300	311	35.5	1.00	3540	3763	3630
7		CLST3-A	$300 \times 3.69 \times 900$	100	311	54.4	0.11	2090	2189	2255
8		CLST3-B	$300 \times 3.76 \times 900$	100	311	54.4	0.11	2090	2205	2281
9		CLST4-A	$300 \times 3.70 \times 900$	200	311	54.4	0.44	3810	3656	3620
10		CLST4-B	$300 \times 3.77 \times 900$	200	311	54.4	0.44	3950	3683	3651
11		C2-A	$300 \times 3.74 \times 900$	300	311	54.4	1.00	4896	5146	4977
12		C2-B	$300 \times 3.87 \times 900$	300	311	54.4	1.00	4976	5025	4851

Figura 22 Resultados clasificados por geometría y método (experimental, modelo EF y regresión) (Fu-xing Ding y otros 2014).

De los resultados mostrados en la Figura 22, se observa que los tres métodos utilizados para obtener la capacidad de los tubos de acero circulares huecos rellenos de hormigón (experimental, modelo EF y regresión) presentan buena similitud con valores cercanos entre sí, sin embargo la utilización de las fórmulas de regresión no representan un sentido físico de los efectos que se producen en una columna corta CFT, lo que puede desacreditar un poco el método para cuestiones de inclusión en alguna norma, pero no deja de ser buena referencia para futuras investigaciones o diseños.

Específicamente el modelo derivado de análisis de regresión, contempla la relación de la capacidad de la sección de acero entre la capacidad de la sección de hormigón por separado (Φ), además incluye el parámetro β definido anteriormente, la resistencia a compresión del hormigón (f_c) y el área de la aplicación de la carga axial (A_{cb}).

$$N_b = \beta^{0.05\Phi-0.65}(1 + 1.7\Phi)f_c * A_{cb} \quad (2.15)$$

$$\Phi = \frac{f_y * A_s}{f_c * A_c} \quad (2.16)$$

Las conclusiones de este estudio se fijan principalmente en la importancia de la forma de la aplicación de la carga, que genera resistencias últimas y tipos de falla diferentes. Validaron la formulación del análisis de regresión mediante el modelo de elementos finitos desarrollado y los resultados experimentales. Algunas de las fallas se produjeron por abolladura local en dirección exterior a la sección del CFT, esto refuerza la idea de que en columnas cortas CFT si se puede retrasar la falla por abolladura local obteniendo resistencias más altas y diseños más óptimos.

Capítulo 3

MÉTODOS Y MODELOS

3.1 Eurocódigo 4 (EC4)

Los cálculos y diseños en Europa están regulados por el conjunto de normas denominado Eurocódigo, dichas normas son publicadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), este se encarga de estudiar los diferentes métodos comunes en los estados pertenecientes a la Unión Europea para luego establecer los procedimientos generales que finalmente serán publicados. Por lo expuesto anteriormente es imprescindible incluir las directrices de esta norma para el desarrollo de esta investigación.

Específicamente, en el apartado 6.7 del Eurocódigo 1994-1-1, se encuentran todas las normas referentes a Columnas compuestas y elementos compuestos a compresión. En este inciso se disponen las normas que se deben seguir para el dimensionamiento de CFT, existen diferentes tipos de secciones de pilares compuestos, por lo tanto es importante identificar lo que es aplicable a los CFT y las condiciones específicas que deben cumplir según la geometría y tipos de material. Durante este apartado se explicará detalladamente las disposiciones que se deben seguir para el diseño de los CFT basado en las normas del Eurocódigo 4.

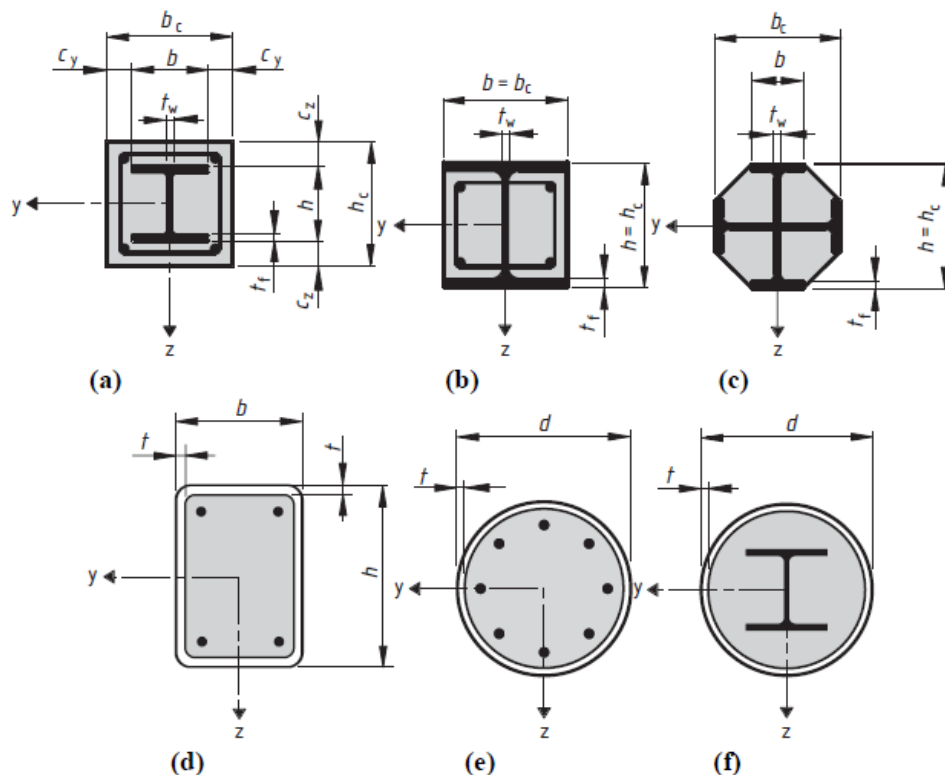


Figure 6.17 : Typical cross-sections of composite columns and notation

Figura 23 Tipos de secciones de pilares compuestos según EC4.

Antes de entrar en cualquier cálculo, es importante destacar que el Eurocódigo 4 advierte que las directrices expuestas en el apartado 6.7 sólo aplican si se cumplen ciertas condiciones; el grado del acero de los elementos debe estar entre S235 y S460 y la resistencia a compresión del hormigón entre C20/25 y C50/60, los elementos a diseñar deben ser columnas aisladas o elementos compuestos a compresión pertenecientes a un sistema de pórticos en donde los demás elementos son compuestos o de acero. Otra condición para aplicar el método del EC4 es que la cuantía mecánica de acero debe estar entre 0,2 y 0,9 ($0,2 \leq \delta \leq 0,9$), propiedad que se explicará posteriormente, finalmente se debe elegir el método a implementar ya que existen 2, el método general para elementos no simétricos o de secciones no uniformes en su longitud, y el método simplificado que aplica para elementos doblemente simétricos y de sección uniforme en su longitud, este último es el elegido para esta investigación, teniendo en cuenta que el estudio se centra en secciones circulares, lo que brinda simetría y uniformidad en toda su longitud.

El cálculo de los pilares huecos de acero rellenos de hormigón de esta investigación se inclina hacia la resistencia seccional de pilares cortos, por lo tanto no se tienen en cuenta problemas de pandeo local. Para poder hacer esta asunción el Eurocódigo 4 limita la relación del diámetro de la sección y el espesor del acero en relación con la resistencia del acero, es por eso que en el apartado 6.7.1, se encuentra la Tabla 6.3 (Ver Figura 24) que muestra la fórmula que restringe la geometría de la sección permitiendo obviar los problemas por pandeo local.

Table 6.3 : Maximum values (d/t) , (h/t) and (b/t_f) with f_y in N/mm²

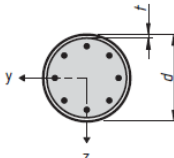
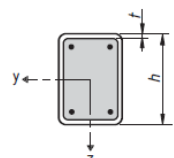
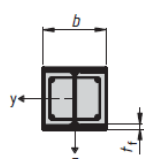
Cross-section	Max (d/t) , max (h/t) and max (b/t_f)
Circular hollow steel sections 	$\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
Rectangular hollow steel sections 	$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Partially encased I-sections 	$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Figura 24 Limitación de sección para obviar problemas de pandeo local (EC4).

3.1.1 Método simplificado de diseño

Debido a las características de las secciones estudiadas en esta investigación, como se comentó anteriormente se eligió el método simplificado de diseño, este método facilita el procedimiento de cálculo para los CFT, sin embargo investigaciones previas (Johansson, 2002 – Hatzegiorgiu, 2008) han demostrado que el planteamiento de este método es muy conservador, y que el confinamiento que el acero le proporciona al hormigón puede aumentar significativamente la resistencia de la sección. Aunque en el EC4 se tienen en cuenta factores que incluyen este confinamiento con ciertas limitaciones, no es del todo preciso con respecto a ensayos experimentales e investigaciones que se han realizado anteriormente.

Para aplicar este método se requiere que la esbeltez relativa no supere 2,0, más adelante se explica en detalle cómo calcular esta propiedad:

$$\bar{\lambda} \leq 2,0 \quad (3.1)$$

La resistencia plástica a compresión de la sección se calcula con la siguiente fórmula que se compone de la contribución a la resistencia seccional del acero y la del hormigón:

$$N_{pl,Rd} = A_a * f_{yd} + A_c * f_{cd} \quad (3.2)$$

Se aprecia que la anterior fórmula para la resistencia seccional a compresión no tiene en cuenta el efecto de confinamiento que le proporciona el tubo de acero al hormigón, el EC4 propone otra fórmula en donde se puede tener en cuenta este fenómeno, sin embargo debe cumplir ciertas limitaciones, la esbeltez relativa no puede superar 0,5 y la relación de excentricidad y diámetro de sección no deben superar 0,1:

$$\bar{\lambda} \leq 0,5 \quad (3.3)$$

$$e/d \leq 0,1 \quad (3.4)$$

Donde,

d = Diámetro de la sección

$e = M_{Ed}/N_{Ed}$

M_{Ed} = Momento solicitado

N_{Ed} = Axil solicitado

Al cumplir estas limitaciones se puede aplicar el procedimiento del EC4 que tiene en cuenta el confinamiento del hormigón por parte de la sección circular hueca del acero. Este procedimiento consiste en incluir en la resistencia seccional factores que aumentan

el aporte tanto del acero como del hormigón. A continuación se detalla el cálculo explicado:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a * Aa * f_{yd} + Ac * f_{cd} (1 + \eta_c * \frac{t}{d} * \frac{f_{yk}}{f_{ck}}) \quad (3.5)$$

Donde,

$t =$ Espesor de la sección de acero

- Para elementos a compresión $e = 0 \rightarrow \eta_a = \eta_{ao}$ y $\eta_c = \eta_{co}$

$$\eta_{ao} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}) \text{ pero } \leq 1 \quad (3.6)$$

$$\eta_{co} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \text{ pero } \geq 0 \quad (3.7)$$

- Para elementos en flexocompresión con $0 < e/d \leq 0,1$:

$$\eta_a = \eta_{ao} + (1 - \eta_{ao})(10 - e/d) \quad (3.8)$$

$$\eta_c = \eta_{co}(1 - 10e/d) \quad (3.9)$$

- Para $e/d > 0,1 \rightarrow \eta_a = 1$ y $\eta_c = 0$

Teniendo claro cómo se calcula la resistencia seccional incluyendo el efecto de confinamiento, se puede proceder a hallar las propiedades limitantes de radio de contribución del acero, esbeltez relativa y rigidez de flexión efectiva:

$$0,2 \leq \delta = \frac{Aa * f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,9 \quad (3.10)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (3.11)$$

Donde,

$N_{pl,Rk}$

= Valor característico de resistencia plástica a compresión sin confinamiento.

$$N_{pl,Rk} = Aa * f_{yk} + Ac * f_{ck} \quad (3.12)$$

N_{cr} = Carga elástica normal crítica en el modo de pandeo relevante

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{(EI)_{eff}}{(\beta * l)^2} \quad (3.13)$$

Donde,

$$(EI)_{eff} = Ea * Ia + Ke * Ecm * Ic \quad (3.14)$$

$$I_a = \text{Momento de inercia de la sección de acero} = \frac{\pi}{4} (R_{ext}^4 - r_{int}^4) \quad (3.15)$$

$K_e = \text{Factor de corrección} = 0,6$

$$I_c = \text{Momento de inercia de la sección de hormigón} = \frac{\pi}{4} r_{int}^4 \quad (3.16)$$

$\beta = \text{Coeficiente de longitud de pandeo}$

$l = \text{longitud del elemento}$

3.1.2 Eurocódigo 4 para CFT Flexocomprimidos

Para los pilares circulares huecos rellenos de hormigón que se vean sometidos a flexocompresión, es necesario calcular los momentos máximos que resiste la sección, para esto no existe la posibilidad de calcular los momentos a partir de fórmulas simplificadas, por lo tanto es necesario llevar a cabo el cálculo del diagrama de interacción (Ver Capítulo 3.4). El EC4 en su apartado 6.7 establece que se puede simplificar el cálculo de este diagrama hallando cuatro puntos estratégicos para formar un polígono que se aproxime al valor exacto del diagrama.

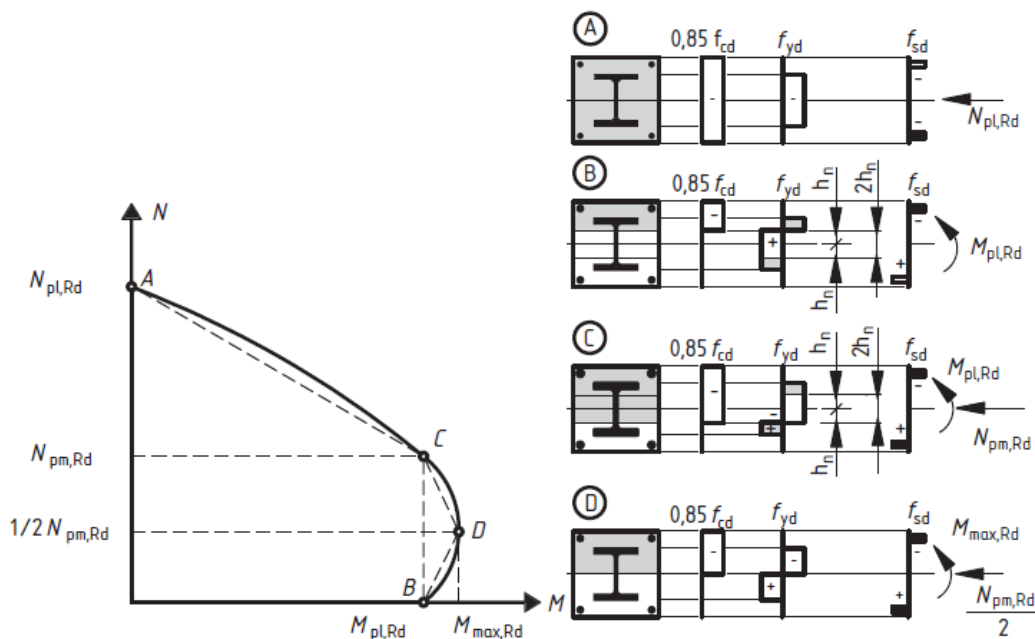


Figure 6.19 : Simplified interaction curve and corresponding stress distributions

Figura 25 Aproximación del diagrama de interacción según EC4.

Punto A: En este punto la sección sólo se encuentra sometida a compresión, la excentricidad de carga es 0. No existe momento a resistir por lo tanto la capacidad de la sección viene dada por la contribución de la sección de acero y la de hormigón ($N_{pl,Rd}$).

Punto B: Como se observa en la Figura 3, en este punto no existe axil concomitante, por lo tanto el esfuerzo solicitante es flexión pura, lo que significa que la resistencia de la sección está dada exclusivamente por $M_{pl,Rd}$. Cabe destacar que en este punto las fuerzas de compresión del hormigón y del acero se encuentran en equilibrio con la fuerza del acero traccionado.

Punto C: En este punto el momento resistente plástico coincide con el del punto B, pero en este se encuentra un axil concomitante, el cual se puede asumir como $N_{pm,Rd}$ (contribución a compresión del área del hormigón); este axil se relaciona con el $M_{pl,Rd}$ del punto B para obtener la coordenada en el diagrama.

Punto D: En este punto se obtiene la capacidad máxima a flexión de la sección, este valor no es representativo para el diseño pero complementa el polígono de aproximación del diagrama de interacción. Esta resistencia máxima a flexión viene relacionada con la mitad de la contribución del hormigón a compresión ($1/2 N_{pm,Rd}$). En este estado la fibra neutra coincide con el centro geométrico de la sección.

Para este estudio no se utiliza la aproximación por medio del cálculo de los puntos del polígono de aproximación sugerido por el EC4, en cambio se utiliza el procedimiento iterativo que divide la sección en pequeñas fibras en donde se evalúa en cada una el estado seccional (ver Capítulo 3.4), construyendo un diagrama de interacción más completo y aproximado que permite aproximar mucho más la solución de la capacidad de un CFT sometido a flexocompresión. Finalmente como último apunte, se establece que los efectos del cortante y su procedimiento de diseño no se incluyen en este estudio, en el cual sólo se incluyen elementos a compresión ó a flexocompresión.

3.2 AISC 360 – 10

La AISC (American Institute of Steel Construction), cuya sede principal se encuentra en la ciudad de Chicago, es un instituto sin ánimo de lucro fundado en 1921 para beneficio de la comunidad de diseño de acero y la industria de la construcción en los Estados Unidos. Dentro de sus misiones se encuentra el desarrollo de especificaciones y códigos que unifiquen la industria, aportando calidad y seguridad con información confiable y actualizada.

Dentro de los códigos que ha publicado la AISC se encuentra el 360 – 10, el cual se titula Especificaciones para Edificios de Acero Estructural, y es donde están las normas referentes al diseño de CFT en el apartado I (Diseño de elementos compuestos).

Para utilizar el procedimiento de diseño de la AISC, primero se debe tener en cuenta las limitaciones que exigen sobre los materiales; la resistencia a compresión del hormigón

debe estar entre 21 y 70MPa y el límite elástico del acero no puede superar el valor de 525MPa.

El AISC clasifica los elementos compuestos dependiendo la geometría de las secciones transversales, en el caso de los CFT se clasifican según la relación del diámetro de la sección entre el espesor del tubo de acero (D/t). Existen dos límites que generan tres tipos de secciones, compactas, no compactas y esbeltas; las compactas se limitan por el valor λ_p , si se supera este valor pero no el límite λ_r , se consideran no compactas, y por último si se supera λ_r se consideran esbeltas, pero existe un límite de D/t máximo permitido que ningún elemento puede sobrepasar. A continuación se muestran las tabla que contiene dichas limitaciones:

TABLE I1.1A Limiting Width-to-Thickness Ratios for Compression Steel Elements in Composite Members Subject to Axial Compression For Use with Section I2.2				
Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	λ_p Compact/ Noncompact	λ_r Noncompact/ Slender	Maximum Permitted
Walls of Rectangular HSS and Boxes of Uniform Thickness	b/t	$2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Round HSS	D/t	$\frac{0.15E}{F_y}$	$\frac{0.19E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

Figura 26 Límite para clasificación de elementos compuestos a compresión según AISC.

TABLE I1.1B Limiting Width-to-Thickness Ratios for Compression Steel Elements in Composite Members Subject to Flexure For Use with Section I3.4				
Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	λ_p Compact/ Noncompact	λ_r Noncompact/ Slender	Maximum Permitted
Flanges of Rectangular HSS and Boxes of Uniform Thickness	b/t	$2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Webs of Rectangular HSS and Boxes of Uniform Thickness	h/t	$3.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Round HSS	D/t	$\frac{0.09E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$	$\frac{0.31E}{F_y}$

Figura 27 Límites para clasificación de elementos compuestos a flexión según AISC.

Luego de establecer el tipo de sección según la relación D/t , el siguiente paso es remitirse al inciso I2, en donde se encuentran las especificaciones relativas al diseño por fuerza axial. En este procedimiento hay que tener en cuenta la clasificación de la sección, debido a que las fórmulas de resistencia cambian según el tipo. Si se trata de una sección compacta, el acero puede aplicar un efecto de confinamiento al hormigón de tal manera que su resistencia llega a desarrollarse en un 95% ya que las paredes del tubo de acero pueden desarrollar plastificación antes del pandeo local.

$$P_{no} = F_y * A_s + 0,95f'_c * A_c \quad (3.17)$$

En el caso de que el CFT sea clasificado como no compacto, la resistencia nominal se encuentra entre los límites λ_p y λ_r mediante una relación cuadrática de las resistencias en estos dos puntos y la relación D/t (λ) propia de la sección. Las dos resistencias límites se tratan de un límite superior (P_p) en donde el hormigón, al igual que en las secciones compactas, alcanza a desarrollar el 95% de su resistencia gracias al confinamiento proporcionado por el acero. El límite inferior (P_y) se trata de la condición en donde el acero puede desarrollar plastificación casi simultáneamente al efecto de pandeo local, sin embargo el hormigón luego de alcanzar una resistencia alrededor $0,7f'_c$ experimenta una dilatación volumétrica la cual no puede ser debidamente confinada por el acero que se encuentre bajo el efecto de pandeo local, por lo tanto el hormigón no puede desarrollar su máxima resistencia.

$$P_p = F_y * A_s + 0,95f'_c * A_c \quad (3.18)$$

$$P_y = F_y * A_s + 0,7f'_c * A_c \quad (3.19)$$

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3.20)$$

La última posible clasificación de CFT es cuando se considera esbelta, en esta clasificación la sección experimenta pandeo local, el comportamiento posterior al pandeo del acero se ve restringido por el hormigón mientras este se encuentre en su rango elástico, sin embargo como se ha explicado anteriormente el hormigón luego de sobrepasar el 70% de sus resistencia experimenta una dilatación volumétrica que en este caso empeora los efectos del pandeo local en el tubo de acero siendo este incapaz de confinar debidamente el hormigón en expansión. Este comportamiento de la sección de acero hace que el AISC proponga una corrección al límite elástico del acero para poder calcular la resistencia P_{no} de la sección con el aporte del 70% de la resistencia del hormigón.

$$P_{no} = F_{cr} * A_s + 0,7f'_c * A_c \quad (3.21)$$

$$F_{cr} = \frac{0,72F_y}{\left(\left(\frac{D}{t}\right)\frac{F_y}{E_s}\right)^{0,2}} \quad (3.22)$$

Luego de calcular la resistencia nominal de la sección (P_{no}), la AISC 360 – 10 propone una serie de fórmulas y limitaciones en las que se incluyen los efectos de longitud, la esbeltez del elemento y las tensiones residuales. Los conceptos más importantes para tener en cuenta dichos efectos, son la carga crítica de Euler para el pandeo local (P_e), calculada utilizando la longitud crítica de pandeo (KL) y la rigidez efectiva a flexión teniendo en cuenta la contribución tanto de la sección de acero como la de hormigón. A continuación se detallan las fórmulas que permiten hallar la resistencia última a compresión de los CFT (P_n).

$$\text{Si } \frac{P_{no}}{P_e} \leq 2,25 \quad \rightarrow \quad P_n = P_{no} \left(0,658 \frac{P_{no}}{P_e}\right) \quad (3.23)$$

$$\text{Si } \frac{P_{no}}{P_e} > 2,25 \quad \rightarrow \quad P_n = 0,877 P_e \quad (3.24)$$

Donde,

$$P_e = \pi^2 \frac{(EI)_{eff}}{(K*L)^2} \quad (3.25)$$

$$(EI)_{eff} = E_s * I_s + C_3 * E_c * I_c \quad (3.26)$$

$$I_s = \text{Momento de inercia de la sección de acero} = \frac{\pi}{4} (R_{ext}^4 - r_{int}^4) \quad (3.27)$$

$$C_3 = 0,6 + 2 \left[\frac{A_s}{A_c + A_s} \right] \leq 0,9 \quad (3.28)$$

$$I_c = \text{Momento de inercia de la sección de hormigón} = \frac{\pi}{4} r_{int}^4 \quad (3.29)$$

K = Coeficiente de longitud de pandeo

l = longitud del elemento

Las consideraciones anteriores estaban relacionadas con la resistencia a compresión de la sección compuesta, para estudiar secciones sometidas a flexocompresión se debe calcular la resistencia flexión del elemento (M_n), este valor no es posible calcularlo con formulación cerrada, es necesario construir el diagrama de interacción de la sección para saber si el momento y el axil concomitante pueden ser asumidos por el elemento en cuestión.

Según el tipo de sección, también se deben tener consideraciones para el valor del momento nominal resistido (M_n). Para secciones compactas el valor es el directamente calculado como el momento plástico con el desarrollo de un 95% de la resistencia del hormigón, en donde las fuerzas de compresión del hormigón y acero comprimido se igualan a la fuerza del acero traccionado, ocasionando un estado límite de resistencia.

Secciones Compactas,

$$M_n = M_p \quad (3.30)$$

En el caso de las secciones no compactas, el momento nominal resistente no es igual al momento plástico. El valor de la resistencia nominal a flexión se encuentra linealmente condicionada por los límites en donde el hormigón desarrolla el $95\%f'_c$ (M_p) y $70\%f'_c$ (M_y), esta limitación es causa de la expansión volumétrica del hormigón cuando este llega a $0,7f'_c$, fenómeno que no favorece el confinamiento. Explicado lo anterior es necesario calcular dos momentos resistentes (M_p y M_y) y relacionarlos linealmente con sus respectivas relaciones D/t (λ).

Secciones No Compactas,

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (3.31)$$

Se aprecia que la relación entre los momentos M_p y M_y es lineal, esto difiere de la relación entre las resistencias P_p y P_y , las cuales se relacionan cuadráticamente. Lai. Z y otros (2014), en estudios previos, presenta la siguiente figura que muestra la diferencia entre las relaciones de las resistencias a compresión y las resistencias a flexión según el tipo de sección.

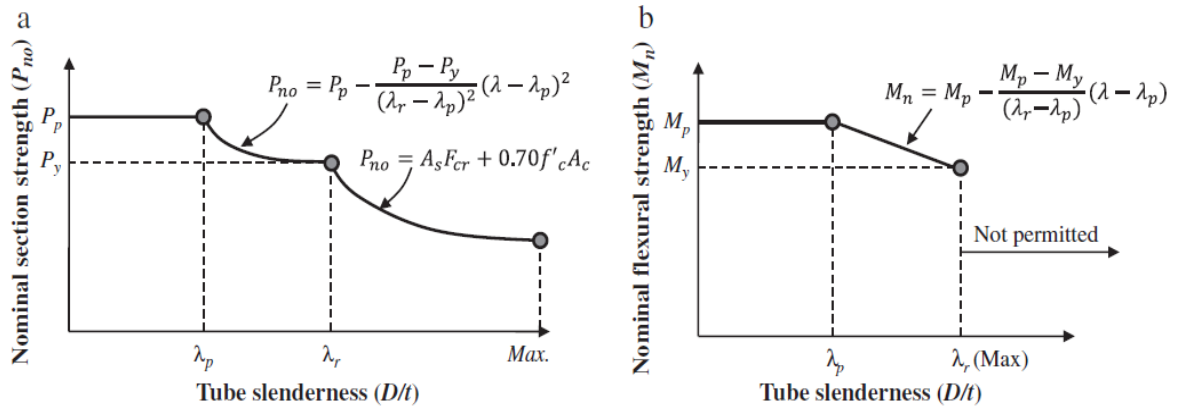


Fig. 3. Variation of: (a) nominal axial compressive strength and (b) nominal flexural strength with respect to the slenderness ratio.

Figura 28 Relación entre P_p y P_n (compresión) y relación entre M_p y M_y (flexión) (Lai. Z, 2014).

La Figura 28 es un resumen acertado del cálculo de la resistencia nominal de secciones circulares huecas rellenas de hormigón, ya que nos informa los diferentes tipos de secciones y los límites los cuales están condicionados. Para secciones esbeltas se debe calcular a M_n con la resistencia a compresión del hormigón limitada a $0,7f'_c$ y el límite elástico del acero condicionado por F_{cr} , al igual que en el cálculo de la resistencia a compresión para este mismo tipo de secciones.

En la norma AISC 360 -10 en su apartado I5 (Acción combinada de flexión y fuerza axial), indica que aunque hay que tener en cuenta las disposiciones del diseño a compresión ó flexión pura, no es suficiente para llegar al cálculo de la capacidad del elemento. Para estos existen dos opciones, la primera es utilizar las fórmulas iterativas propuestas en la sección H1.1, y la segunda es realizar una discretización por fibras de la sección en estudio , variando el lugar del eje neutro y calculando para cada uno de estos el momento resistente, lo que lo vuelve en un procedimiento iterativo.

Fórmulas iterativas según AISC 360 – 10,

$$\text{Si } \frac{Pr}{Pc} \geq 0,2 \quad \rightarrow \quad \frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1.0 \quad (3.32)$$

$$\text{Si } \frac{Pr}{Pc} < 0,2 \quad \rightarrow \quad \frac{Pr}{2Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1.0 \quad (3.33)$$

Donde,

Pr = Resistencia a compresión requerida.

Pc = Resistencia a compresión disponible.

Mr = Resistencia a flexión requerida

Mc = Resistencia a flexión disponible

x = subíndice relacionado al eje fuerte a flexión

y = subíndice relacionado al eje débil a flexión

El procedimiento iterativo por fibras, en donde se varía la posición del eje neutro, es expuesto de manera general en por Z. Lai y otros (2014), las siguientes figuras esquematizan el procedimiento.

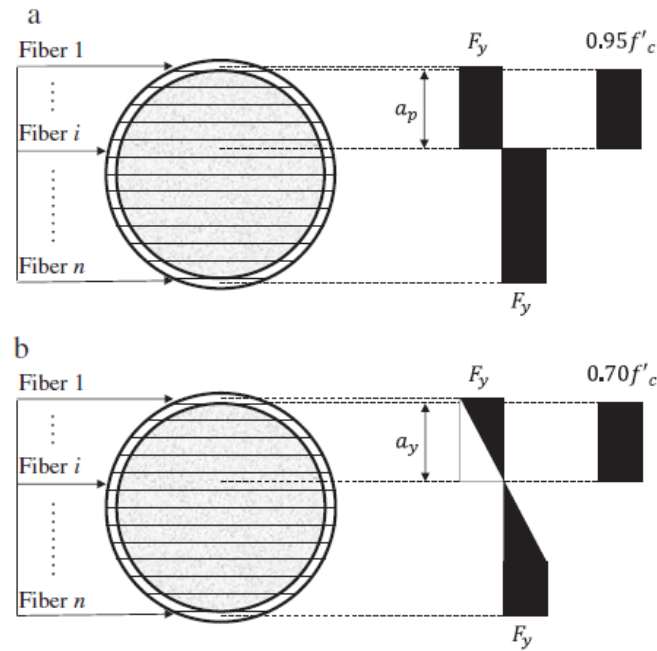


Fig. 4. Stress blocks used to calculate the flexural strength of circular CFT beams: (a) stress block for M_p ; and (b) stress block for M_y .

Figura 29 Diagrama del procedimiento iterativo por fibras (Lai, Z y otros 2014).

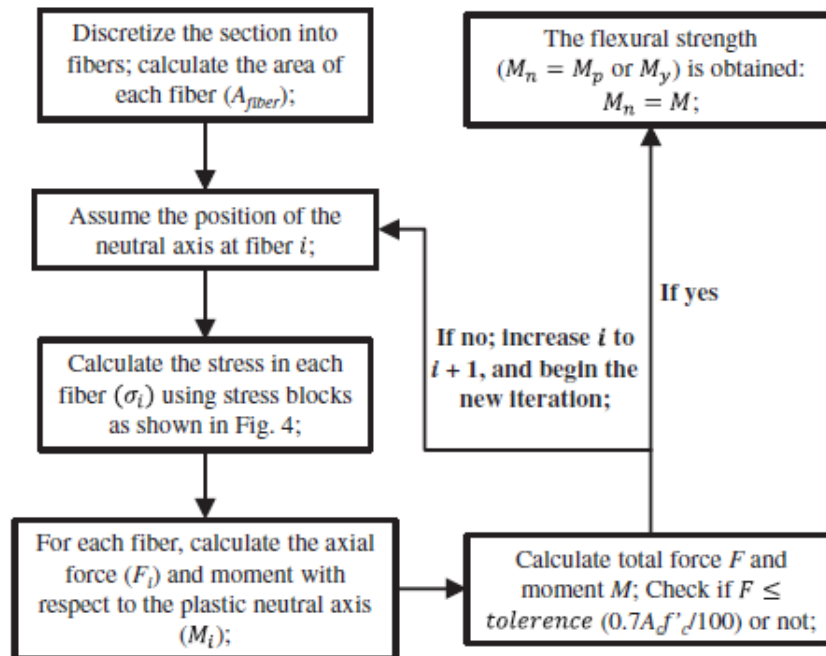


Fig. 5. Algorithm to calculate M_p and M_y of circular CFT members.

Figura 30 Explicación del procedimiento iterativo por fibras (Z.Lai y otros 2014).

La discretización por fibras de la sección y la variación del eje neutro, son procedimientos que no van en contra de lo expuesto en la ASIC 360 – 10, ya que tal como lo dice la norma se calculan los esfuerzos mediante el equilibrio de fuerzas tanto del acero como del hormigón. En este estudio el procedimiento iterativo de la sección H1.1 de la AISC 360 -10 y el método de Z. Lai sólo se toman como referencia, ya que en todos los métodos de cálculo de resistencia de secciones circulares huecas rellenas de hormigón se utilizará el método realizado por R. Chacón (2012), en donde se realiza una discretización de la sección en fibras y permite llegar a una solución automatizada con la posibilidad de tener en cuenta las condiciones y limitaciones de cada procedimiento en específico.

3.3 Modelo propuesto por Johansson

Mathias Johansson publicó una investigación en el 2002 en donde describe el comportamiento mecánico de las columnas cortas CFT, teniendo en cuenta la eficacia del efecto de confinamiento que le proporciona el tubo de acero al núcleo de hormigón dependiendo de la resistencia del hormigón y el espesor del tubo de acero. Para este análisis Johansson ensayó 12 columnas cortas CFT con carga axial concentrada que le permitió desarrollar un modelo mecánico para predecir la capacidad de este tipo de elementos basándose en la interacción del núcleo de hormigón y el tubo de acero.

Estudios previos han demostrado que el modelo de Johansson se aproxima de muy buena manera a los resultados experimentales de otros estudios, razón que dio pie para que este modelo sea incluido en esta investigación como método de diseño acompañando la norma europea y americana.

Entre los objetivos de Johansson para este estudio se encuentra la de demostrar que los CFT son una alternativa viable para utilizar hormigón de alta resistencia, ya que el efecto de confinamiento del núcleo de hormigón proporcionado por las paredes del tubo de acero hace que incluso para hormigón de alta resistencia se consiga una falla dúctil, situación que solucionaría el problema de la ubicación numerosos estribos con separaciones pequeñas en elementos de hormigón armado de alta resistencia para confinar el hormigón y evitar fallas frágiles.

El comportamiento mecánico de una columna corta CFT depende directamente de la capacidad de deformación volumétrica de los materiales (deformaciones laterales), situación ligada al desarrollo del confinamiento pasivo, ya que el hormigón y el acero presentan coeficientes de Poisson distintos, lo que produce deformaciones diferentes para cada material bajo una misma carga.

Es de recordar que los CFT tratados en este modelo son cargados concéntricamente por lo tanto las deformaciones longitudinales deben ser iguales. Johansson definió una deformación axial corregida que permite relacionar las deformaciones longitudinales del acero y del hormigón.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{al} = \varepsilon_c = 0.002 \quad (3.34)$$

En el caso de los CFT, al estar el hormigón encamisado por un tubo de acero, los dos materiales deben deformarse de igual forma para alcanzar la compatibilidad de esfuerzos ($\varepsilon_{ah} = \varepsilon_{ch}$), lo que genera contracción o expansión por parte de los materiales dependiendo el nivel de carga aplicada. Es conocido que el coeficiente de Poisson del acero es mayor que el del hormigón, lo que genera que el tubo de acero se deforme más rápidamente que el hormigón imposibilitando el efecto de confinamiento pasivo ($\varepsilon_{ch} < \varepsilon_{ch}$), sin embargo a la medida que se incrementa la carga, el hormigón comienza a plastificar y las deformaciones alcanzan las del acero ($\varepsilon_{ch} > \varepsilon_{ch}$), produciendo el efecto de confinamiento pasivo. De lo anteriormente se pueden deducir que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{ah} = \varepsilon_{ahf} + \varepsilon_{ahr} = -\nu_a \varepsilon_v + \varepsilon_{ahr} \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_{ch} = \varepsilon_{chf} - \varepsilon_{chr} = -\nu_c \varepsilon_v - \varepsilon_{chr} \quad (3.36)$$

Las deformaciones ε_f corresponden a aquellas que se producen si el acero y el hormigón se pudieran deformar libremente, pero en el caso de los CFT los dos materiales se deben deformar conjuntamente, lo que genera que el hormigón tenga una deformación libre excesiva ($-\varepsilon_{chr}$), y el acero tenga una deformación adicional ($+\varepsilon_{ahr}$) (Ver figura 32).

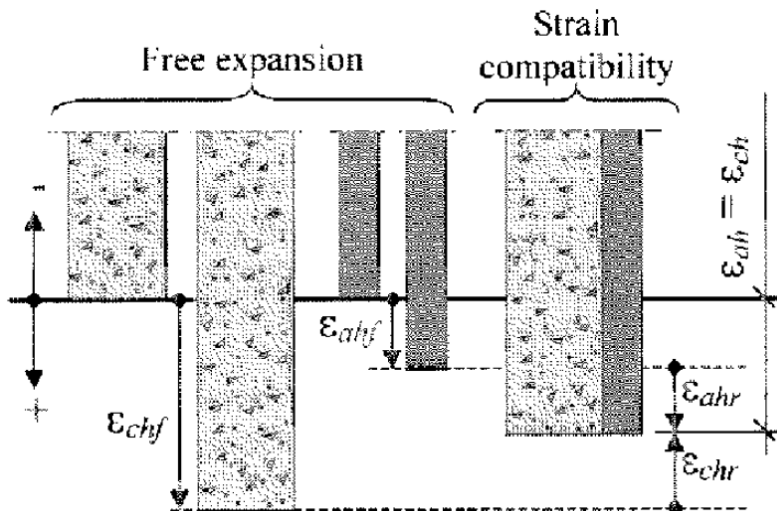


Figura 31 Deformación libre y restringida del hormigón y el acero (Johansson, 2002).

Establecidos los conceptos relacionados con las deformaciones en los CFT, se puede proceder a definir el estado tensional de estos elementos, en donde el hormigón se encuentra cargado de manera triaxial y el acero biaxial, como lo muestra el siguiente diagrama de cuerpo libre:

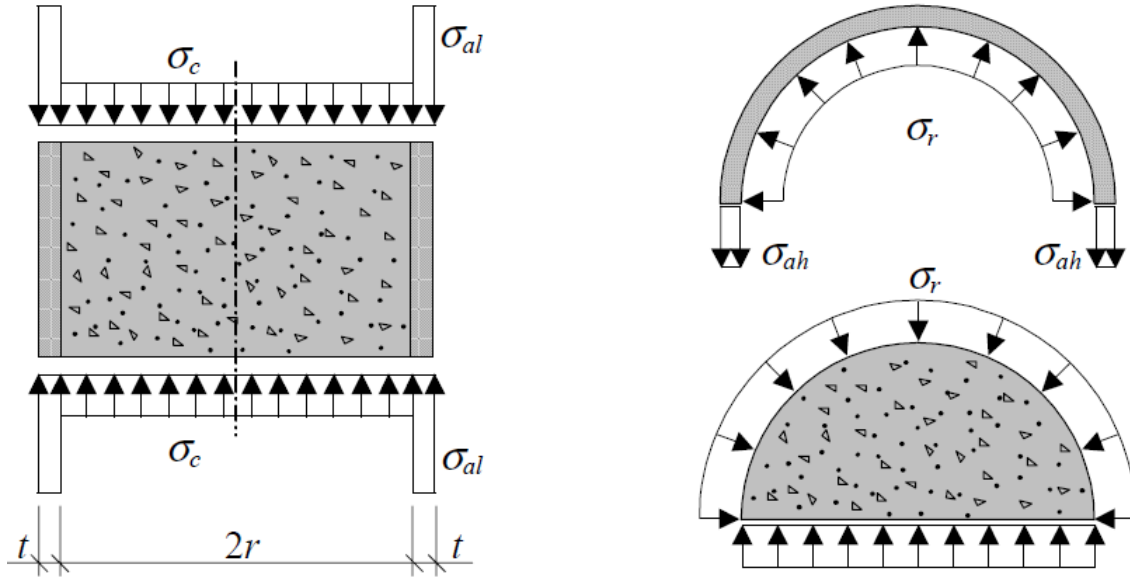


Figura 32 Diagrama de cuerpo libre del estado tensional de un CFT (Johansson, 2002).

De este diagrama (Ver Figura 32), se puede realizar un equilibrio de fuerzas horizontales asumiendo un comportamiento lineal de los materiales, para luego expresar una ecuación que considere el comportamiento de las deformaciones antes explicado. A continuación se presentan las ecuaciones que se generan a partir de los equilibrios de fuerza pertinentes:

$$2r * \sigma_{ch} = 2t * \sigma_{ah} \rightarrow 2r * \varepsilon_{chr} E_c = 2t * \varepsilon_{ahr} E_a \quad (3.37)$$

$$\varepsilon_{ahr} = \frac{\varepsilon_v(v_a - v_c)}{\left(1 + \frac{tE_a}{rE_c}\right)} \quad \text{para} \quad (\varepsilon_{chf} > \varepsilon_{ahf}) \quad (3.38)$$

Modelo del hormigón

En la propuesta de Johansson, es necesario explicar el modelo de comportamiento del hormigón que propone, ya que es aquí donde se modifica la resistencia a compresión del hormigón por una resistencia mayor producida por el confinamiento pasivo. Este comportamiento no es trivial, el confinamiento puede variar dependiendo de las deformaciones laterales que se produzcan en el CFT, y Johansson eligió basarse en el modelo propuesto por Attard y Setunge (1996) por su versatilidad en aceptar diferentes resistencias de hormigón y presiones de confinamiento.

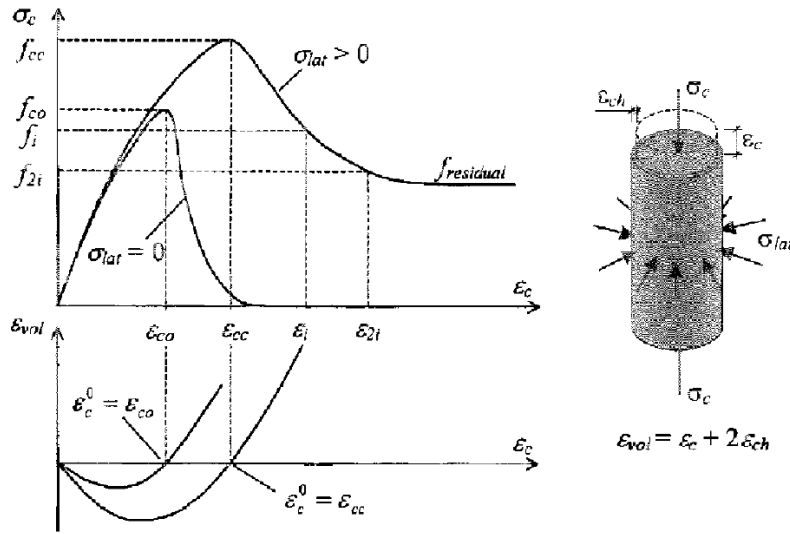


Figura 33 Modelo de comportamiento del hormigón confinado utilizado (Johansson, 2002).

En este modelo se aprecia que existe una resistencia inicial fco , esta puede aumentarse dependiendo la tensión lateral (σ_{lat}) al que se ve sometido el hormigón por parte del tubo de acero, efecto que genera el confinamiento pasivo. De este modelo surge la siguiente fórmula que calcula la resistencia a compresión del hormigón confinado (fcc) teniendo la σ_{lat} a la que se ve sometido, acompañado de la resistencia a tensión del hormigón (fct) y del coeficiente k que evalúa la eficiencia del confinamiento.

$$fcc = fco \left(\frac{\sigma_{lat}}{fct} + 1 \right)^k \quad (3.39)$$

$$k = 1.25 \left[1 + 0.062 \frac{\sigma_{lat}}{fco} \right] fco^{-0.21} \quad (3.40)$$

Para calcular la tensión lateral que se produce en el núcleo de hormigón, se utiliza la forma generalizada de la ley de Hooke en dos dimensiones, ya que el acero se encuentra en estado de carga biaxial. Para el cálculo de la capacidad del CFT sólo se utiliza la tensión circunferencial (σ_{ah}), esta multiplicada por la relación del radio y el espesor del tubo de acero proporciona la σ_{lat} correcta que actúa en el núcleo de hormigón. La tensión longitudinal no interfiere en el confinamiento por lo tanto no se utiliza en la predicción de la capacidad del CFT.

$$\sigma_{ah} = \frac{Ea}{1-\nu_a^2} (\epsilon_{ah} + \nu_a \epsilon_{al}) \quad (3.41)$$

$$\sigma_{al} = \frac{Ea}{1-\nu_a^2} (\epsilon_{al} + \nu_a \epsilon_{ah}) \quad (3.42)$$

$$\sigma_{lat} = \sigma_{ah} \frac{r}{t} \quad (3.43)$$

El modelo de Johansson arroja resultados muy cercanos a bases de datos experimentales que se han realizado en otros estudios, es por eso que fue incluido en como método de predicción de capacidad en esta investigación, sin embargo al no depender de la esbeltez del elemento no se puede aplicar en columnas largas en donde puedan surgir problemas de inestabilidad.

Su aplicación en este estudio consiste en calcular la resistencia a compresión del hormigón confinado (f_{cc}) a partir de las deformaciones y las tensiones que se producen entre el acero y el hormigón como se ha explicado anteriormente. Teniendo la f_{cc} adecuada se procede a iniciar el método iterativo por fibras que finalmente generará los datos para construir el diagrama de interacción que permite establecer la capacidad del CFT.

3.4 Método iterativo por fibras (cálculo diagrama de interacción seccional N-M)

En el estudio de esta investigación sobre CFT, es de especial interés calcular la resistencia seccional a flexocompresión, de esta manera se incluyen elementos que se vean sometidos a fuerzas axiales y a momentos flectores. Incluidas las normas vigentes europeas y americanas, además de varias publicaciones científicas recientes, se observa que es necesario construir un diagrama de interacción seccional de flexocompresión en donde se pueda evaluar la resistencia del elemento en cualquier estado tensional que este se vea sometido.

Para el cálculo del diagrama de interacción es necesario recurrir a un método iterativo que brinde la posibilidad de calcular los estados tensionales suficientes para construir la totalidad del diagrama de interacción. Varias investigaciones y recomendaciones de las normas apuntan que una manera simplificada es la discretización de la sección transversal en fibras horizontales, cada una de estas fibras corresponde a una iteración relacionada con una posición de la fibra neutra, en donde se realiza un equilibrio de fuerzas de compresión (hormigón y acero) y tracción (acero), y asumiendo perfecta plasticidad de los materiales se calcula el estado tensional de esta posición, generando un momento con su respectivo axil concomitante. El cálculo de numerosos estados tensionales variando la posición del eje neutro crea un conjunto de esfuerzos que pueden ser graficados para realizar el diagrama de interacción (N-M).

Existen diferentes métodos para calcular los esfuerzos seccionales variando la posición del eje neutro, en esta investigación se tomará como base el realizado por Chacón. R y otros (2012), estudio en el cual mediante aproximaciones geométricas debido a la forma circular de la sección, y aproximaciones por bloques de los esfuerzos de tensión y compresión, se hallan los brazos de las fuerzas resultantes y equilibrando estas

finalmente se llega a los valores del estado tensional. La siguiente Figura 34 y 35 esquematizan el procedimiento:

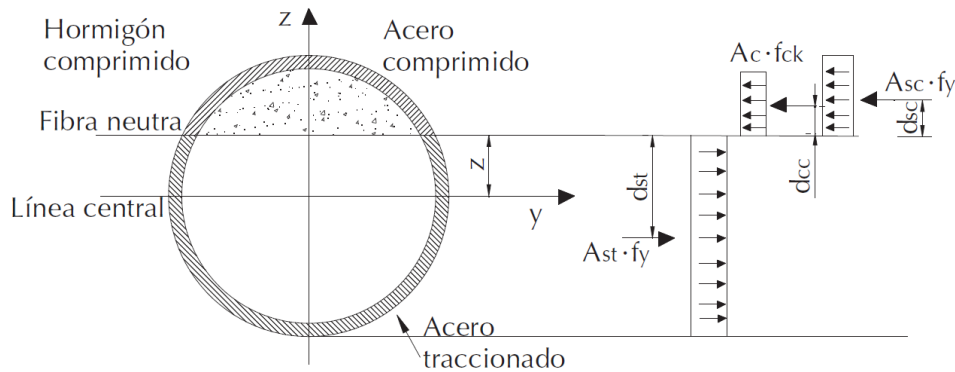


Figura 34 Esquema del método de iteración por fibras variando la posición del eje neutro (Chacón y otros 2012).

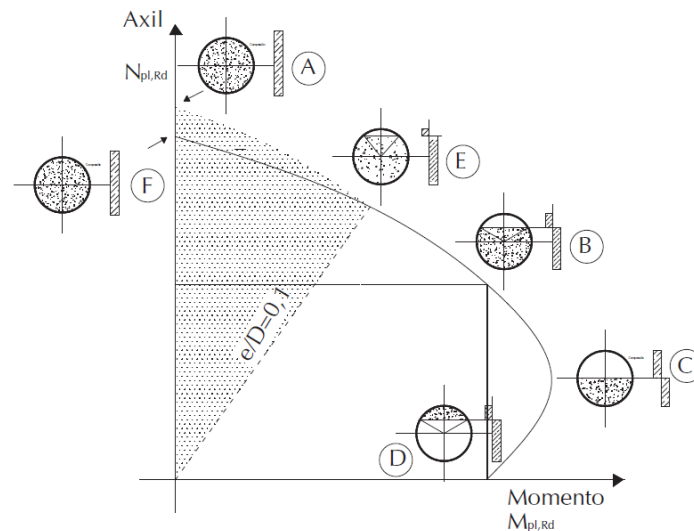


Figura 35 Diagrama de interacción simplificado según Eurocódigo 4 para CFT (Chacón y otros 2012).

En la Figura 34 se observa la sección delimitada por la posición del eje neutro, la cual genera esfuerzos que se aproximan mediante bloques de compresión y tracción que a su vez producen los brazos de las fuerzas de compresión del hormigón y del acero y fuerza de tensión del acero. En la Figura 35 se muestra la simplificación que propone el Eurocódigo 4 para el diagrama de interacción en 5 puntos significativos que luego pueden ser unidos para aproximar el diagrama, sin embargo no se utilizará dicha relación ya que el método por discretización de fibras es más exacto.

Entrando más en detalle en el procedimiento propuesto por R.Chacón y otros (2012), a continuación se presentarán paso a paso el cálculo de la iteración de la posición de la fibra neutra. Con respecto a este procedimiento cabe mencionar que el primer paso es calcular ciertas variables auxiliares necesarias para el cálculo, luego se calculan las áreas de la fibra seccionada tanto de hormigón como de acero con sus respectivos

centros de gravedad, finalmente se posee toda la información para calcular las fuerzas de tensión y compresión con la distancia de los brazos de cada componente lo que supone poder hallar los esfuerzos del estado tensional en cuestión. Cabe destacar que el procedimiento se divide en dos partes, la primera corresponde a los valores que se encuentran debajo del punto C (Ver Figura 35), y la segunda parte corresponde a los valores por encima de este punto. Esto se debe a que en este punto la posición de la fibra neutra coincide con el centro geométrico de la sección, lo que genera cambios directos en el cálculo de las áreas comprimidas y traccionadas, dando lugar a otra etapa del método por discretización de fibras.

Primera parte, valores por debajo del punto C:

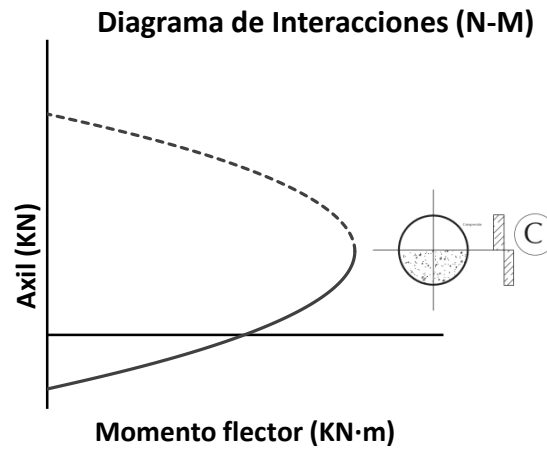


Figura 36 Primera parte del método iterativo por fibras (valores por debajo del punto C).

Variables auxiliares,

$$i = 0.100 \quad (3.44)$$

$$hn_i = 0.009999999999999 * d_{int} * \frac{i}{2} \quad (3.45)$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2 - hn^2} \quad (3.46)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{hn}{y}\right) \quad (3.47)$$

$$c\theta = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (3.48)$$

Área sector circular de hormigón,

$$asch = c\theta \left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2 \quad (3.49)$$

Centro de gravedad sector circular de hormigón,

$$cgsch = \left(\frac{\text{Sen}(c\theta)}{c\theta} \right) 2 \frac{d_{int}}{2*3} \quad (3.50)$$

Área de triángulo para aproximación,

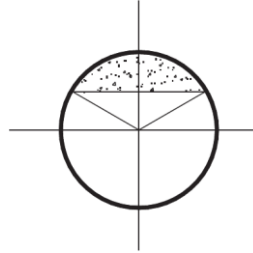


Figura 37 Área de triángulo para aproximación.

$$ath = hn * y \quad (3.55)$$

Centro de gravedad del triángulo,

$$cgth = 2 * \frac{hn}{3} \quad (3.56)$$

Área comprimida de hormigón,

$$ach = asch - ath \quad (3.57)$$

Centro de gravedad del área comprimida del hormigón,

$$cgch = \left[\frac{(cgsch*asch - ath*cgth)}{(asch - ath)} \right] \quad (3.58)$$

Área comprimida de acero,

$$ascs = c\theta \left(\frac{d_{ext}}{2} \right)^2 - c\theta \left(\frac{d_{int}}{2} \right)^2 \quad (3.59)$$

Área comprimida de acero para sector externo,

$$asce = c\theta \left(\frac{d_{ext}}{2} \right)^2 \quad (3.60)$$

Centro de gravedad sector circular acero externo,

$$cgsce = \left(\frac{\text{Sen}(c\theta)}{c\theta} \right) 2 \frac{d_{ext}}{2*3} \quad (3.61)$$

Centro de gravedad corona circular acero comprimido,

$$cgcs = \left[\frac{(cgsce*asce - cgsch*asch)}{(asce - asch)} \right] \quad (3.62)$$

Área de la sección traccionada de acero,

$$asts = As - ascs \quad (3.63)$$

Centro de gravedad corona circular acero traccionado,

$$cgts = \left[\frac{-cgcs * ascs}{(As - ascs)} \right] \quad (3.64)$$

Componente del hormigón a compresión,

$$Fhc = ach * fc \quad (3.65)$$

Componente del acero a compresión,

$$Fsc = ascs * fy \quad (3.66)$$

Componente del acero a tracción,

$$Fst = asts * fy \quad (3.67)$$

Equilibrio interno de componentes (axil),

$$N = Fhc + Fsc - Fst \quad (3.68)$$

Momento flector,

$$M = Fhc * cgch + Fsc * cgcs - Fst * cgts \quad (3.69)$$

Segunda parte, puntos por encima del punto C:

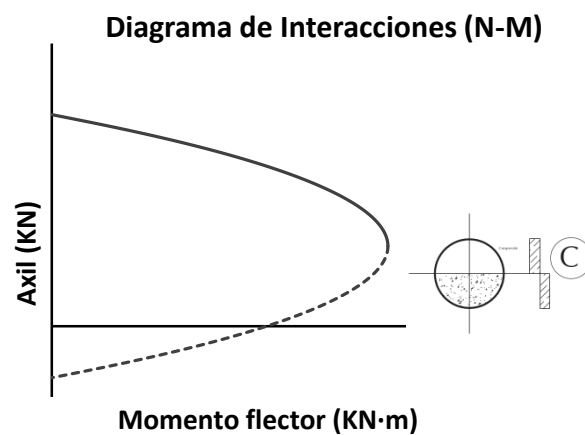


Figura 38 Diagrama de interacción (N-M).

Variables auxiliares (subíndice 2 hace referencia segunda parte),

$$i_2 = 0.100 \quad (3.70)$$

$$hn_{i2} = 0.009999999999999 * d_{int} * \frac{i_2}{2} \quad (3.71)$$

$$y_2 = \sqrt{\left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2 - hn_2^2} \quad (3.72)$$

$$\theta_2 = \text{atan}\left(\frac{hn_2}{y_2}\right) \quad (3.73)$$

$$c\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \quad (3.74)$$

Área sector circular de hormigón,

$$asch_2 = c\theta_2 \left(\frac{d_{int}}{2}\right)^2 \quad (3.75)$$

Área sector circular externo de acero,

$$ascs_2 = c\theta_2 \left(\frac{d_{ext}}{2}\right)^2 \quad (3.76)$$

Área corona circular acero traccionado,

$$ast_2 = ascs_2 - asch_2 \quad (3.77)$$

Área corona circular acero comprimido,

$$asc_2 = As - ast_2 \quad (3.78)$$

Centro de gravedad sector circular,

$$cgsch_2 = \left(\frac{\text{Sen}(c\theta_2)}{c\theta_2}\right) 2 \frac{d_{int}}{2*3} \quad (3.79)$$

Área del triángulo para aproximación,

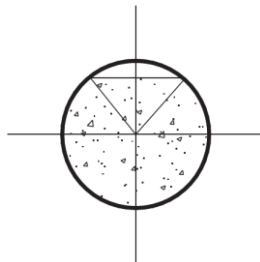


Figura 39 Área de triángulo para aproximación.

$$ath_2 = (hn_2 * y_2) \quad (3.80)$$

Centro de gravedad del triángulo,

$$cgth_2 = 2 * \frac{hn_2}{3} \quad (3.81)$$

Área traccionada hormigón,

$$atr h_2 = asch_2 - ath_2 \quad (3.82)$$

Área comprimida hormigón,

$$acr h_2 = \pi \left(\frac{d_{int}}{2} \right)^2 - atr h_2 \quad (3.83)$$

Centro de gravedad del área traccionada hormigón,

$$cgtr h_2 = \left[\frac{cgsch_2 * asch_2 - ath_2 * cgth_2}{asch_2 - ath_2} \right] \quad (3.84)$$

Centro de gravedad del área comprimida hormigón,

$$cgcr h_2 = \left[\frac{-cgtr h_2 * atr h_2}{\pi \left(\frac{d_{int}}{2} \right)^2 - atr h_2} \right] \quad (3.85)$$

Centro de gravedad del área traccionada acero,

$$cgsce_2 = \left(\frac{\text{Sen}(c\theta_2)}{c\theta_2} \right) 2 \frac{d_{ext}}{2*3} \quad (3.86)$$

Centro de gravedad corona circular acero traccionado,

$$cgts_2 = \left[\frac{cgsce_2 * ascs_2 - cgsch_2 * asch_2}{ascs_2 - asch_2} \right] \quad (3.87)$$

Centro de gravedad corona circular acero comprimido,

$$cgcs_2 = \left[\frac{-cgts_2 * ast_2}{As - ast_2} \right] \quad (3.88)$$

Componente del hormigón a compresión,

$$Fhc_2 = acr h_2 * fc \quad (3.89)$$

Componente del acero a compresión,

$$Fsc_2 = asc_2 * fy \quad (3.90)$$

Componente del acero a tracción,

$$Fst_2 = ast_2 * fy \quad (3.91)$$

Equilibrio interno de componentes (axil),

$$N = Fhc_2 + Fsc_2 - Fst_2 \quad (3.92)$$

Momento flector,

$$M = -Fhc_2 * cgcrh_2 - Fsc_2 * cgcs_2 + Fst_2 * cgts_2 \quad (3.93)$$

Detallado el método de cálculo del diagrama de interacciones (N-M) mediante la discretización de fibras variando la posición de la fibra neutra, se establece que este es el método base que se aplica en cada procedimiento expuesto en esta investigación. La mayor parte del método iterativo consiste en cálculos geométricos que no afecta el hecho de utilizar diferentes procedimientos para cálculo de CFT.

Las condiciones y limitaciones de cada método se incluyen en el cálculo de las componentes, aquí se encuentran la resistencia del hormigón y el límite elástico del acero, propiedades de los materiales que se condicionan según la norma o investigación a desarrollar. A lo largo de la investigación se expondrán las condiciones de cada método y cómo se tienen en cuenta en el cálculo iterativo del diagrama de interacción (N-M).

Capítulo 4

HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

4.1 App Inventor

El desarrollo de esta aplicación se llevó a cabo mediante la plataforma en línea de MIT, App Inventor. Esta herramienta permite el diseño y la programación de aplicaciones móviles de manera gráfica y amigable (Posada, 2016).

El desarrollo de software en App Inventor se comprende de dos interfaces, la primera consiste en la denominada *Diseñador* (Figura 40), en donde se crea el espacio gráfico de la aplicación; se insertan las imágenes, títulos, botones, cuadros de texto, arreglos horizontales o verticales, entre otras herramientas.

Definido los objetos de la interfaz de *Diseñador*, el siguiente paso es trabajar con estos en la segunda interfaz llamada *Bloques* (Figura 41), aquí se desarrolla la programación del software, configurando bloques y funciones que se relacionan con los objetos del *Diseñador* para lograr las acciones que se pretenden en el funcionamiento de la aplicación. Es importante destacar que App Inventor posee bloques de operaciones matemáticas que permiten realizar los cálculos necesarios en todos los métodos propuestos, aunque la creación de numerosas variables puede comprometer la velocidad de la plataforma, la calidad de la conexión a internet y el ordenador a utilizar dependerán de cuanto se pueda exigirá al software (Posada, 2016).

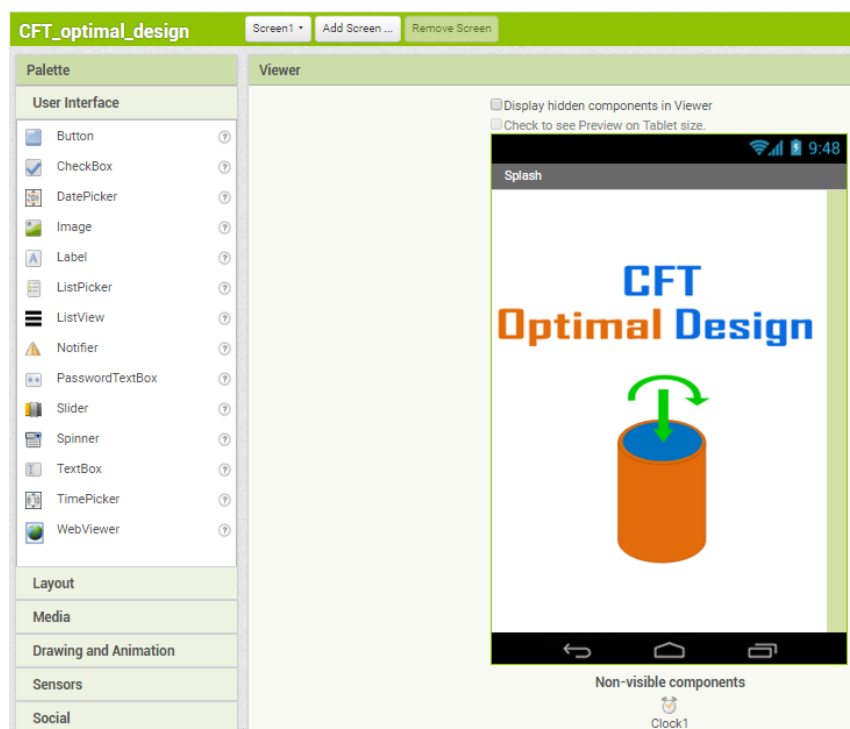
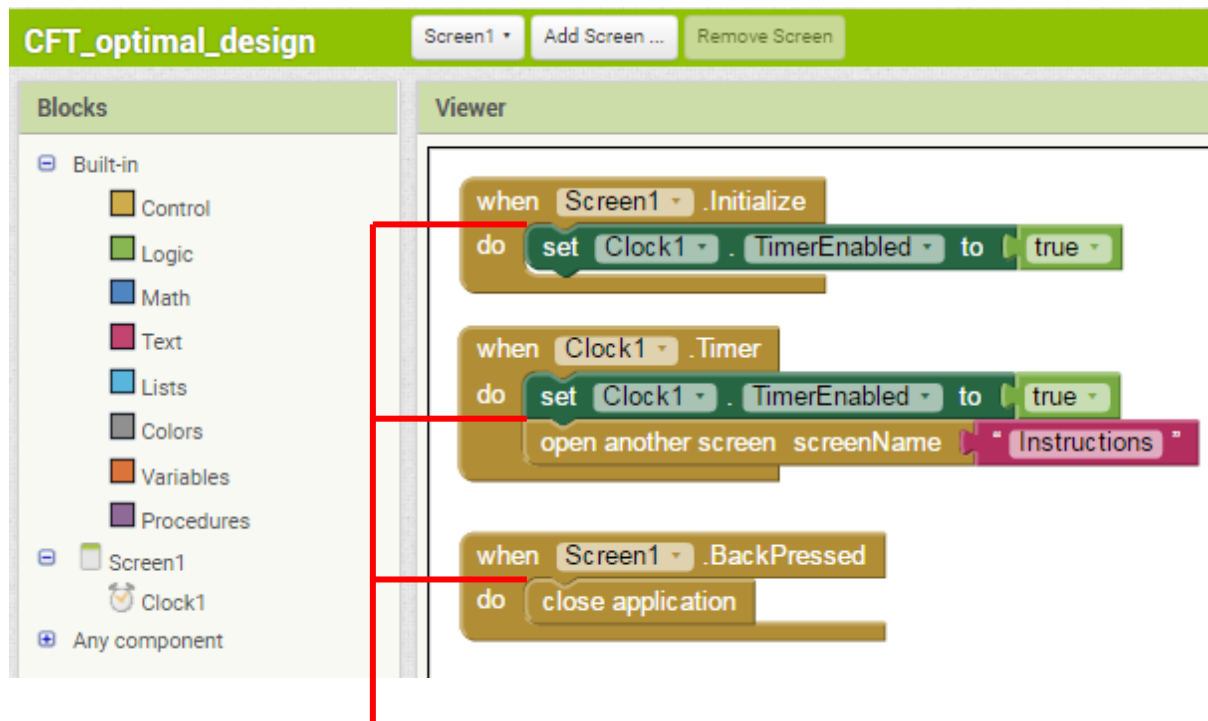


Figura 40 Interfaz Diseñador de App Inventor, se crea el espacio gráfico de la aplicación y se añaden los componentes a utilizar en la programación.



Estos enlaces indican la forma de programar en App Inventor, se enganchan bloques establecidos relacionados con componentes o funciones.

Figura 41 Interfaz Bloques de App Inventor, se desarrolla la programación del software relacionando los componentes creados en el Diseñador con los respectivos bloques.

Se puede observar que la forma de programar en App Inventor es amigable y de fácil comprensión. Si se utilizan los bloques de manera lógica y coherente se pueden obtener muy buenos trabajos de esta plataforma, incluso para el ámbito profesional, desarrollando aplicaciones en menor tiempo gracias a la excelente interfaz para los usuarios. Cabe destacar que la programación por bloques no sólo se utiliza en la plataforma App Inventor, este es un tipo de programación que también es utilizado en otros softwares de desarrollo de algoritmos como por ejemplo *Scratch* y *Beetle Blocks*, que también gracias a una interfaz amigable facilitan el enlace de funciones y elementos. (*Beetle Blocks*, 2016) (*Scratch*, 2016).

4.1.1 Descripción de la aplicación

En este apartado se explicará detalladamente la aplicación desarrollada, cada una de las pantallas que la componen y las funciones que se procesan en cada una. En general se

compone de 5 pantallas, la Figura 42 muestra un esquema en donde se explica de forma general la descripción de la aplicación de cada una de las pantallas programadas.

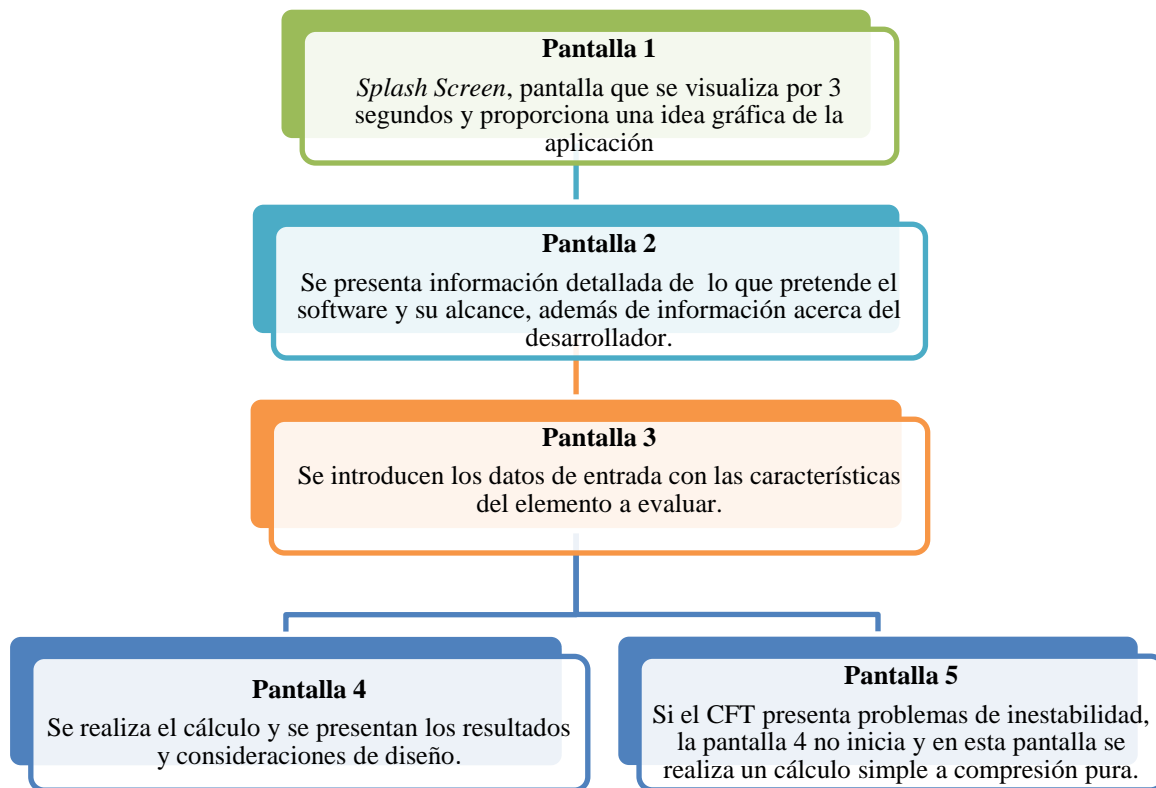


Figura 42 Esquema de descripción de la aplicación y de cada pantalla programada.

Específicamente, la primera pantalla es lo que regularmente se conoce como *Splash Screen*, la cual se trata de una pantalla que por defecto se muestra por unos pocos segundos con algún contenido gráfico que proporcione una idea de lo que se trata la aplicación y le da un plus estético en general.

En la Figura 43 se aprecia que esta primera pantalla presenta una idea gráfica de lo que se trata la aplicación, se muestra un elemento de materiales compuestos sometido a compresión y flexión, y acompañado del título de la aplicación proporciona una primera impresión de lo que será el software.

La segunda pantalla (Figura 44) proporciona información al usuario del alcance de la aplicación, las características del problema estructural que puede resolver, las limitaciones que tiene, los métodos y normas utilizadas e información del desarrollador.



Figura 43 (Izquierda) *Splash Screen*, pantalla de presentación de la aplicación.

Figura 44 (Derecha) *Pantalla Info*, detalla el alcance de la aplicación y su desarrollador.

Básicamente, del problema estructural se informa al usuario que la aplicación calcula elementos circulares de acero rellenos de hormigón sometidos a flexocompresión, utilizando la norma europea y norteamericana y un método propuesto desarrollado por M. Johansson (2002); además de advertir al usuario que algunos elementos pueden tener problemas de inestabilidad en los cuales se desarrolla un cálculo simple de compresión pura teniendo en cuenta la inestabilidad.

Luego de presionar *Continuar* en la pantalla de información (Figura 44), se inicia la pantalla *Input* (Figura 45), en donde el usuario introduce los datos iniciales de las características del elemento a evaluar, específicamente el diámetro externo, el espesor del tubo de acero, la longitud, la resistencia a compresión del hormigón, el límite elástico del acero, la fuerza axial y el momento flector de diseño, y las restricciones de los apoyos.

Figura 45 Pantalla *Input*, se digitan los datos de entrada del elemento a calcular.

Estos datos de entrada presentan varias restricciones que hacen que sólo datos coherentes sean calculados y los resultados no sean desacertados y carentes de sentido físico. Las restricciones que se programaron son:

- Todos los datos deben ser introducidos, ninguna característica del elemento a evaluar puede quedarse sin definir.
- Ningún valor introducido puede ser menor o igual a 0, esto pretende evitar resultados absurdos.
- La resistencia a compresión del hormigón debe estar entre 20 y 60 N/mm², mientras que el límite elástico del acero entre 235 y 460 N/mm², otros valores fuera del rango permitido no serían congruentes con la norma europea y americana.
- No se puede proceder al cálculo sin elegir alguna restricción para el elemento a evaluar, es fundamental para limitar el problema estructural.
- Si el elemento a calcular posee características que hacen que pueda tener problemas de inestabilidad, el software limita esta situación procediendo a un cálculo de compresión pura teniendo en cuenta la inestabilidad. Esta restricción se ajusta a que la esbeltez relativa (λ) sea menor o igual a 0.2.

A continuación se muestran las alertas que la aplicación enseña al usuario en caso de que alguna se presente:

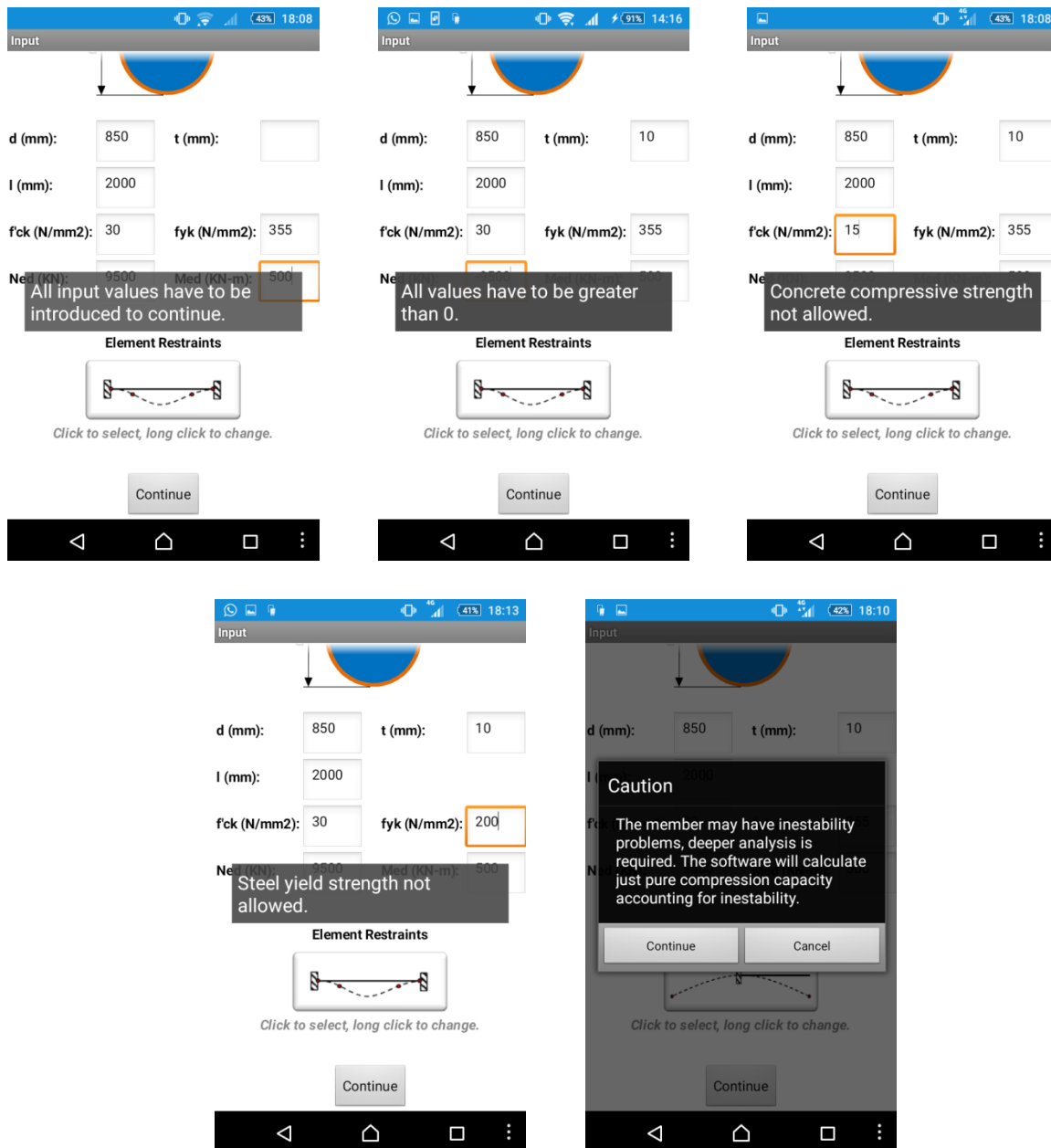


Figura 46 Advertencias que enseña la aplicación en caso de que no se cumpla alguna de las restricciones.

Estas restricciones siempre aparecerán hasta que el usuario no cambie los datos de entrada erróneos y proyecte un elemento que si pueda ser calculado por la aplicación.

Si los datos introducidos son correctos, se procede hacia la pantalla *Output*, en donde se puede iniciar el cálculo del elemento y posteriormente luego de algunos segundos se presentan los resultados, el respectivo diagrama de interacción para cada método, así como la fuerza axial de compresión y el momento flector máximos, los radios de sobreesfuerzo y consideraciones de diseño respecto a los resultados obtenidos.

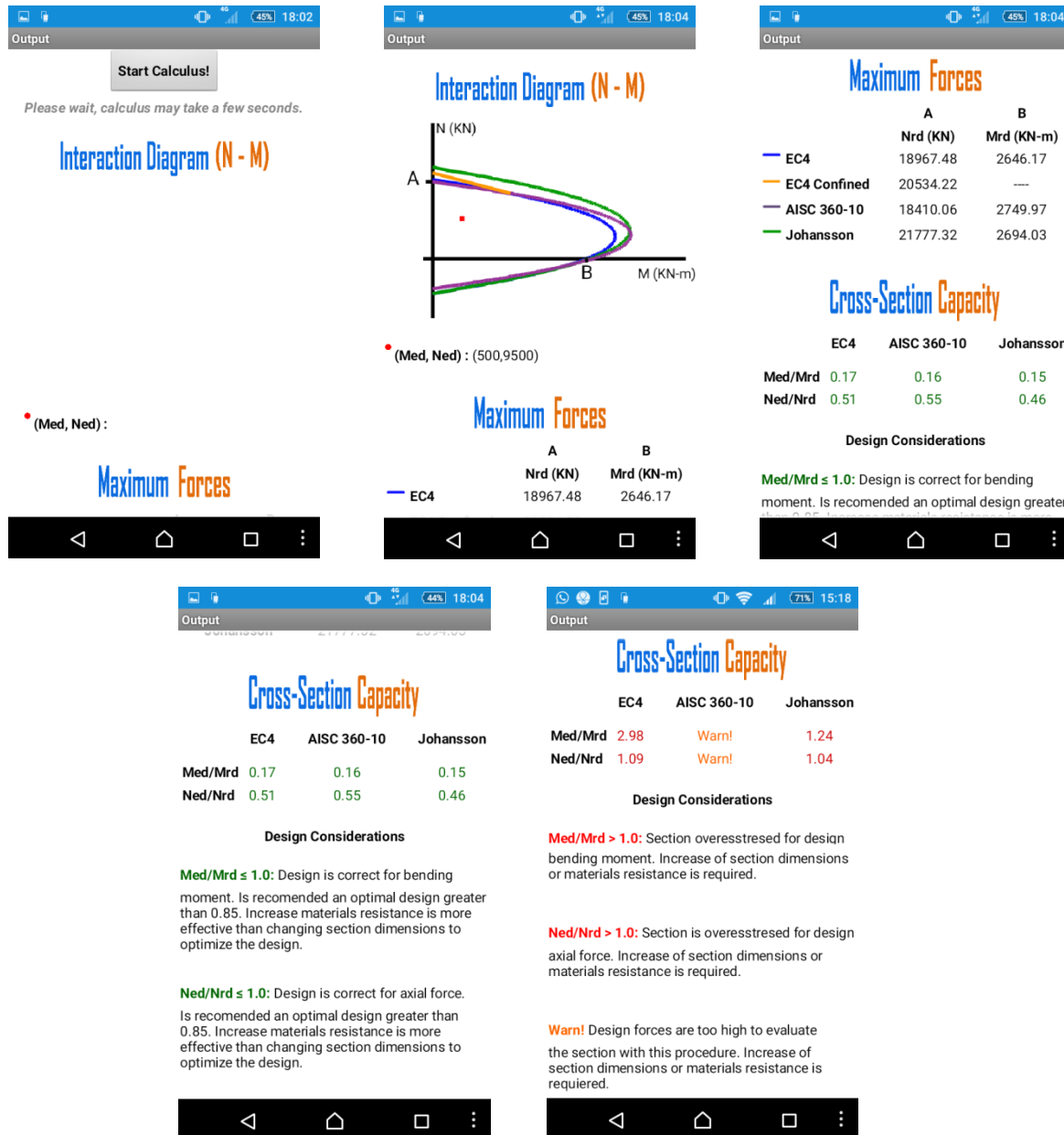


Figura 47 Pantalla Output, se calcula el elemento y se presentan los resultados y las consideraciones de diseño que pueden sugerirse dependiendo de los radios de sobreesfuerzo obtenidos.

En el diagrama de interacción se aprecia el punto de las fuerzas de diseño introducidas, de este modo el usuario puede percibir que tan lejos está el usuario de un diseño óptimo. Las consideraciones de diseño se refieren a sugerencias que el software le propone al usuario para alcanzar un diseño óptimo que resista las fuerzas de diseño con las dimensiones y la resistencia de los materiales más adecuados.

Se programó otra pantalla que consiste en el cálculo de la resistencia seccional a compresión pura teniendo en cuenta problemas de inestabilidad. A este cálculo el usuario puede acceder si el elemento que desea evaluar por su relación diámetro y longitud, presenta esbeltez relativa alta, generando problemas de inestabilidad, situación que requiere un cálculo más profundo y riguroso. Es por eso que como alternativa se presenta esta pantalla *Output*, en donde se puede obtener una idea de lo que resiste el elemento a compresión pura sin la acción de un momento flector.



Figura 48 Pantalla *Output*, cálculo de compresión pura teniendo en cuenta la inestabilidad.

Dentro de las 5 pantallas explicadas anteriormente se desarrolla la aplicación *CFT Optimal Design*, generando una herramienta novedosa y completa para el cálculo, estudio y diseño de tubos circulares de acero rellenos de hormigón.

La interfaz para el usuario es muy sencilla y no sólo presenta los resultados, sino que también sugiere algunas consideraciones de diseño que el usuario puede tomar en cuenta para alcanzar el diseño óptimo que espera.

4.1.2 Funcionalidades de la interfaz *Diseñador*

Expuesta la manera cómo se programa en App Inventor, se explican las funciones que se utilizaron para crear el espacio gráfico de la aplicación en la interfaz *Diseñador*:

- Screen: Cada pantalla que se quiera generar en App Inventor se debe crear como *Screen*. Cada *Screen* posee un código propio y se programa por separado de las otras pantallas. Para interactuar entre pantallas se debe hacer uso de

funcionalidades como *Tiny DB*, que puede guardar datos para utilizarlos en varias pantallas.

- *Clock*: Inicia conteo del tiempo, pueden ser ciclos de milisegundos que se configuran según la conveniencia. En esta aplicación se utilizó para crear la pantalla de presentación, la cual a los 3 segundos continúa a la pantalla de instrucciones.
- *Image*: Se utiliza para importar imágenes guardadas en el ordenador. Esta función puede ser una herramienta muy versátil, ya que permite plasmar imágenes, títulos e íconos que facilitan el diseño visual de la aplicación, por ejemplo para crear títulos con fuentes diferentes se pueden crear en otro software y luego exportar como imagen a App Inventor, brindando la posibilidad de realizar títulos y textos más llamativos.
- *Horizontal, Vertical y Table Arrangement*: Crean un espacio en donde se pueden organizar objetos como imágenes o textos, de forma horizontal, vertical o en forma de tabla. Para la introducción de datos y la presentación de las tablas de resultados, estas herramientas permitieron diseñar una interfaz que permite un uso sencillo para los usuarios.
- *TextBox*: Permite crear cajas en donde se puede digitar y modificar texto desde el móvil. En este caso todos los datos de entrada del elemento a evaluar se introducen mediante esta herramienta (diámetro, espesor, longitud, materiales, fuerzas de diseño).
- *Label*: Se utiliza para crear texto, sin embargo este texto no puede ser modificado por el usuario en el móvil. En esta aplicación se utilizaron *Label* para identificar y presentar los datos de entrada y salida del elemento en cuestión, sin embargo también se utilizan para separar contenidos como títulos, tablas e imágenes, configurando el *Label* sin texto pero con un tamaño específico, creando espacios en blanco de separación.
- *TinyDB*: Esta función permite almacenar datos para ser utilizados posteriormente en diferentes pantallas, además se pueden guardar datos que siempre estén disponibles cuando la aplicación se inicialice. En esta App, guarda los datos de entrada para utilizarlos en el cálculo de las pantallas posteriores.
- *Canvas*: Es un espacio gráfico en donde se pueden dibujar puntos o líneas dentro de un sistema de coordenadas, brindando la posibilidad de crear figuras geométricas o como en este caso trazar gráficas a escala. En el *Canvas* es en

donde se traza el diagrama de interacción de los elementos con los diferentes métodos.

- *Notifier*: Esta herramienta sirve para alertar al usuario de alguna incidencia en el software, por ejemplo, cuando el elemento evaluado puede tener problemas de inestabilidad, la aplicación advierte de esto mediante esta función.

4.1.3 Funcionalidades de la interfaz *Bloques*

En este apartado se explicarán los principales algoritmos que se programaron en App Inventor por medio de su interfaz *Bloques*.

Para algunas acciones que requiere el software es necesario desarrollar algoritmos especiales para alguna situación en particular, por ejemplo, para dibujar el eje X referente a los Momentos en el diagrama de interacción, se debe encontrar la iteración que corresponde al cambio de signo de la fuerza Axil. Es por eso que este apartado proporciona una idea general de cómo se programó la aplicación.

El primer algoritmo especial a considerar, es la creación de la *Splash Screen*, la cual se programa para durar 3 segundos y luego pasar automáticamente a la pantalla *Info*.

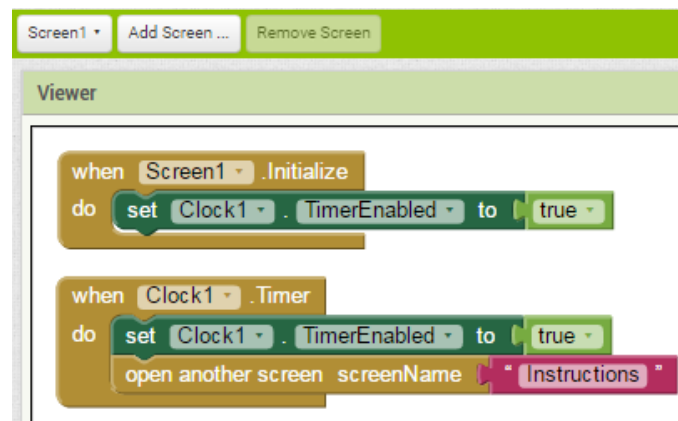


Figura 49 Programación de bloques para la creación de la *Splash Screen*.

En la Figura 49, se aprecia que el *Clock* se inicia al iniciar la aplicación, y este programado a 3 segundos hace que se inicialice la siguiente pantalla (*Info*) automáticamente, es un algoritmo muy sencillo introductorio a la forma de programar en App Inventor, bloques asociados a componentes.

Otro algoritmo a destacar son las restricciones en la pantalla *Input*, se utilizan bloques relacionados con el componente *Notifier*, el cual muestra un mensaje por algunos segundos,

vital para enseñar las alertas al usuario sobre los datos de entrada erróneos que pudo haber digitado (Figura 50).

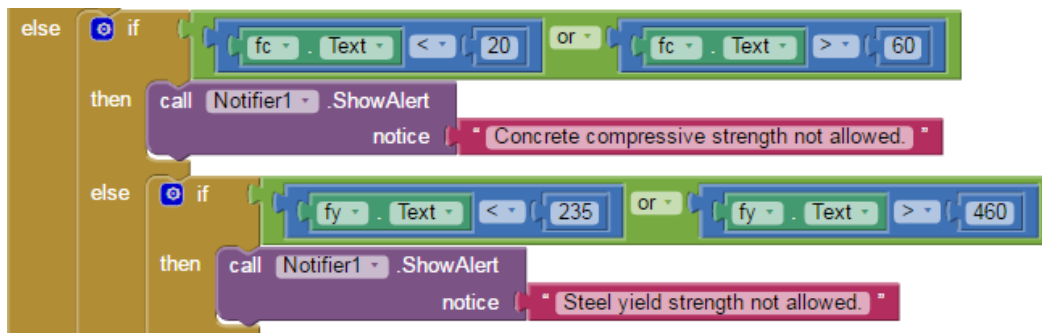


Figura 50 Uso del componente *Notifier*, para alertar a los usuarios sobre datos de entrada erróneos.

Como se ha comentado, para utilizar datos entre pantallas se debe hacer uso del componente *Tiny DB*, en este caso hace que los datos de entrada puedan ser utilizados para el cálculo en la pantalla *Output* (Figura 51).

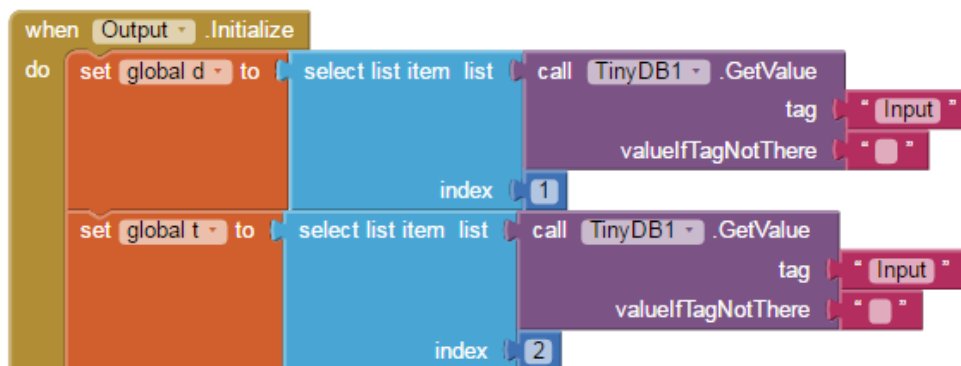


Figura 51 Uso del componente *Tiny DB*, trae datos de la pantalla *Input* para ser utilizados en *Output*.

App Inventor posee herramientas matemáticas fáciles de usar, con las cuales se pueden calcular todos los valores necesarios para completar el cálculo sin mayores contratiempos, la única consideración destacable es la forma como agrupa los paréntesis en las operaciones, programar de afuera hacia dentro es lo más recomendable.

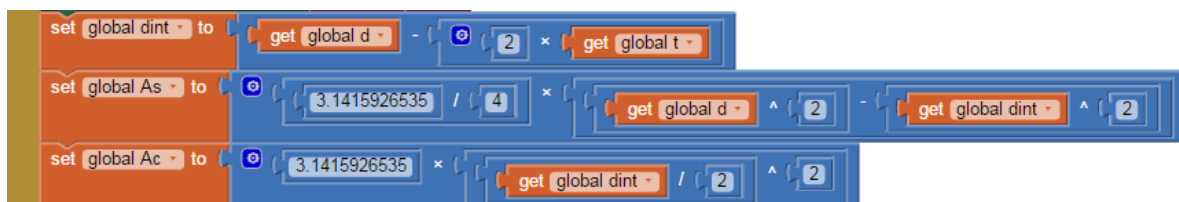


Figura 52 Ejemplo de las herramientas matemáticas en App Inventor.

El método de cálculo propuesto para el diagrama de interacción es iterativo, por lo tanto es necesario realizar múltiples cálculos repetitivamente hasta completar el diagrama. Para

lograr este cálculo se procedió a utilizar comandos *for*, que repiten el cálculo un número i de veces especificado. Para cada método se realizan dos iteraciones, cada una correspondiente a las mitades de la sección evaluada, evaluando compresión en el hormigón y el acero y tensión en el acero.



Figura 53 Inicio del comando *for*, para calcular las iteraciones en cada método.

Para trazar el diagrama de interacción, se procedió a utilizar el componente *Canvas*, sin embargo para mejor visualización gráfica, se deben trazar líneas y no puntos, lo que obliga a calcular i e $i+1$. Además se debe escalar el gráfico dependiendo de la sección proyectada para presentar una visualización adecuada que sea cómoda para el usuario.



Figura 54 Uso del componente *Canvas*, para trazar el diagrama de interacción con sus respectivas escalas.

El eje X correspondiente al Momento, se debe trazar a la altura donde el axil se hace 0, por lo tanto fue imprescindible programar un algoritmo que encuentre el cambio de signo en las iteraciones de la fuerza axil para trazar correctamente el eje X.

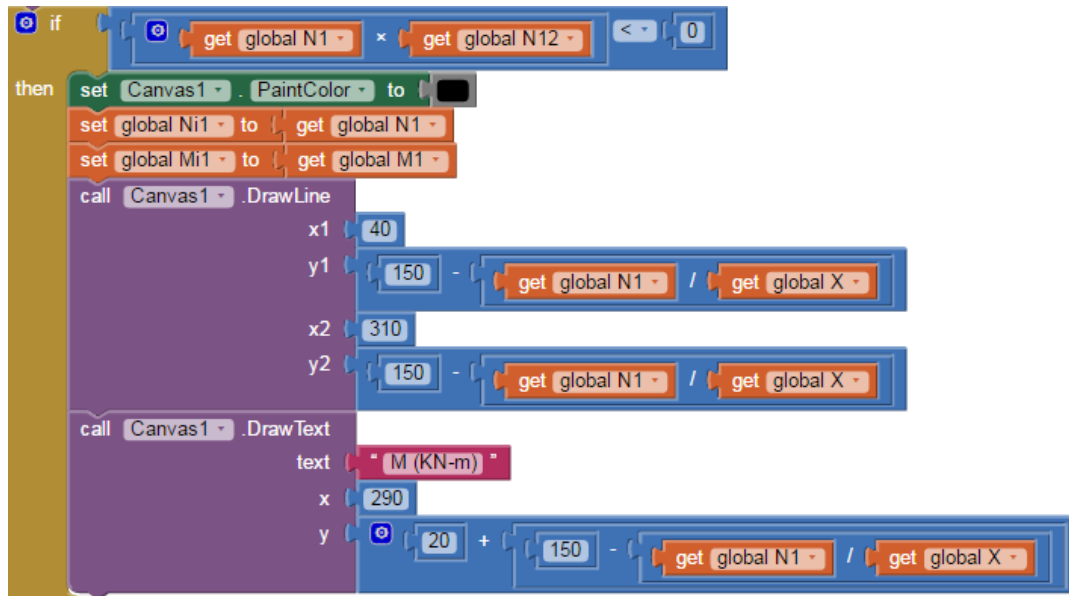


Figura 55 Trazado del eje X correspondiente al Momento.

Otro algoritmo a destacar es el que calcula los radios de sobreesfuerzo tanto para axil como para momento.



Figura 56 Algoritmo para calcular los radios de sobreesfuerzo.

En este caso se busca cuando el momento o axil de diseño es sobrepasado por el momento o axil resistente, de esta manera se asocia una magnitud con la otra y se pueden obtener los axiles resistentes correspondientes al axil de cálculo relacionados con la coordenada de momento adecuada, por lo tanto si el punto de diseño está por fuera del momento o axil máximo, los radios de sobreesfuerzo pierden sentido ya que no se encuentra relación con ninguna fuerza resistente, caso en el cual el software advierte de esto y sugiere cambio de dimensiones y materiales.

Por último, es destacable el cambio de color de fuente para los radios de sobreesfuerzo, teniendo en cuenta que sobre 1.0 el elemento se encuentra sobreesforzado (rojo) y menor a 1.0 el elemento soporta los esfuerzos de diseño (verde), esta distinción visual ayuda al usuario a interpretar los resultados. Además si las fuerzas de diseño son muy grandes para el elemento proyectado, el software advierte con un *Warn!* (anaranjado) que se deben cambiar las dimensiones y la resistencia de los materiales.

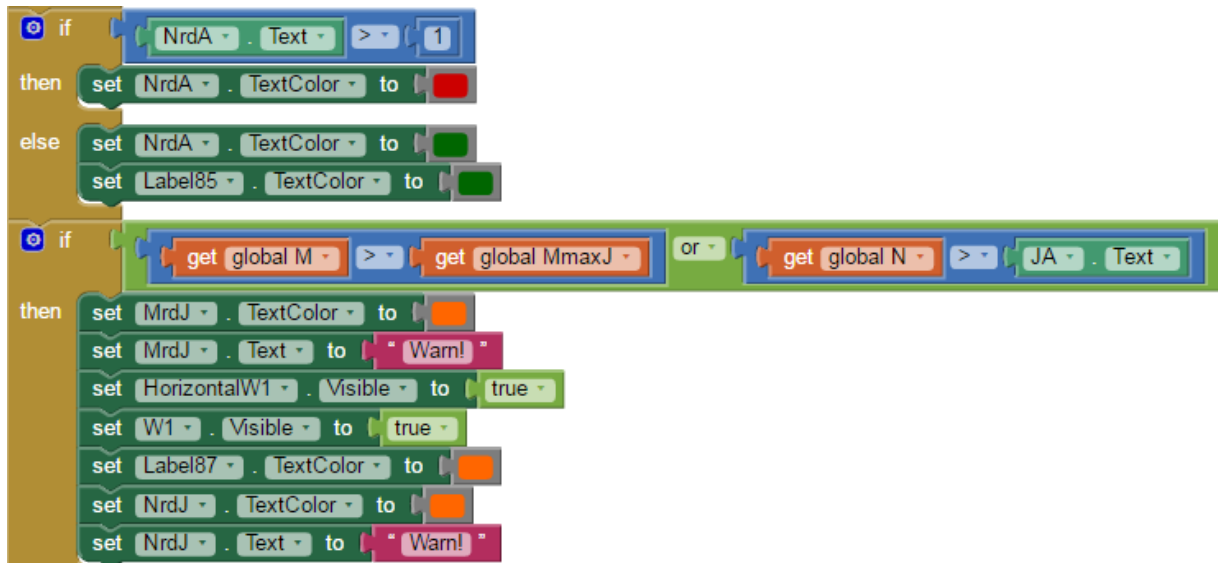


Figura 57 Algoritmo para cambiar el color de la fuente en los radios de sobreesfuerzo y la advertencia de fuerzas de diseño muy grandes para el elemento proyectado.

Se programaron numerosos algoritmos más para llegar al resultado final, los explicados anteriormente son representativos y cumplen el objetivo de proporcionar una idea general de cómo fue la programación en App Inventor y la interfaz que maneja esta plataforma en línea.

Las figuras de los algoritmos representativos, enseña que la base de la programación es relacionar los componentes creados en la interfaz *Diseñador* con los bloques adecuados. Todas las acciones a desarrollar deben estar ligadas a un componente creado en la interfaz *Diseñador* o en variables inicializadas global o localmente.

En App Inventor no es necesario escribir los comandos, la paleta de bloques permite elegir las funciones que se quieren, proporcionando una ayuda visual que permite entender y desarrollar algoritmos de una manera amigable, por lo tanto esta herramienta es recomendable para personas que no posean un profundo conocimiento en programación.

4.2 Excel

El programa *Microsoft Excel*, se utilizó en esta investigación como método de comprobación para los cálculos programados en App Inventor. De esta manera es posible tener una base de cálculos sólida que puede respaldar los resultados de la aplicación.

Excel es una poderosa herramienta que puede realizar gran variedad de cálculos, sin embargo es necesario utilizarlo en un ordenador, y las hojas de cálculo creadas pueden terminar siendo de comprensión personal. Es por eso que contar con una aplicación móvil fácil de emplear para el usuario en cualquier parte es una ventaja importante. Aunque Excel pueda tardar menor tiempo de cálculo, la dificultad de generalización de las hojas de cálculo y la limitación a ordenadores, dan pie a soluciones como las aplicaciones móviles.

Para la comprobación de los resultados calculados por la aplicación, se evaluaron 20 elementos, entre cuales se varió de forma estratégica las dimensiones y las resistencias de los materiales, así se pueden comparar los resultados arrojados por Excel con los calculados por la aplicación móvil. A continuación se presentan en la Figura 58 los elementos evaluados:

Elementos evaluados para la comprobación de resultados (Excel vs App)							
Datos de entrada							
N°	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm ²)	fyk (N/mm ²)	Ned (KN)	Med (KNm)
1	450	5	2000	30	235	2500	300
2	450	7	2000	40	355	2800	350
3	500	5	2000	30	460	3100	400
4	500	7	2000	40	235	3400	450
5	550	5	2000	30	355	3700	500
6	550	7	2000	40	460	4000	550
7	600	6	2000	30	235	4300	600
8	600	8	2000	40	355	4600	650
9	650	6	2000	30	460	4900	700
10	650	8	2000	40	235	5200	750
11	700	6	2000	30	355	5500	800
12	700	8	2000	40	460	5800	850
13	750	6	2000	30	235	6100	900
14	750	8	2000	40	355	6400	950
15	800	7	2000	30	460	6700	1000
16	800	9	2000	40	235	7000	1050
17	850	7	2000	30	355	7300	1100
18	850	9	2000	40	460	7600	1150
19	900	10	2000	30	235	7900	1200
20	900	12	2000	40	355	8200	1250

Figura 58 Tabla de elementos evaluados para la comprobación de resultados.

De la Figura 58, se puede observar que la variación de las características de los elementos se realiza gradualmente para cada dato de entrada. Se evalúan elementos similares con pocos cambios en sus características, por ejemplo se varía el espesor y los materiales pero no el diámetro, de esta manera se podrán establecer conclusiones importantes más adelante a la hora de analizar resultados. La figura 59 muestra el radio de resultados entre los calculados por Excel y los calculados por la aplicación móvil:

Radio de Resultados Excel/App						
N°	EC4		AISC360-10		Johansson	
	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	0.99997	1.00000	0.99998	1.00000	0.99998	1.00000
2	0.99996	0.99998	0.99997	0.99998	0.99997	0.99998
3	0.99996	1.00000	0.99996	1.00000	0.99996	0.98495
4	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	1.00000
5	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000
6	0.99996	0.99998	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000
7	0.99997	0.99998	0.99998	1.00000	0.99998	0.99998
8	0.99997	0.99999	0.99997	1.00000	0.99997	0.99999
9	0.99996	0.99999	0.99996	1.00000	0.99997	1.00000
10	0.99998	1.00000	0.99998	1.00000	0.99998	1.00000
11	0.99997	0.99999	0.99997	1.00000	0.99997	0.99999
12	0.99996	1.00000	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000
13	0.99998	1.00000	0.99998	0.99999	0.99998	1.00000
14	0.99997	0.99999	0.99994	1.00022	0.99997	0.99999
15	0.99996	1.00000	0.99996	1.00000	0.99997	1.00000
16	0.99998	1.00000	0.99998	0.99999	0.99998	0.99999
17	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000	0.99997	0.99999
18	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000
19	0.99997	1.00000	0.99998	1.00000	0.99998	1.00000
20	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000	0.99997	1.00000

Figura 59 Tabla de Radio de resultados entre los calculados por Excel y los calculados por la aplicación móvil.

Claramente en la anterior tabla (Figura 59) se aprecia que los resultados calculados por Excel son prácticamente iguales a los calculados por la aplicación móvil, todos los radios de resultados son muy cercanos a 1.0, con esto se comprueba que dos herramientas numéricas completamente diferentes llegan a los mismos resultados, situación que es clave para establecer que la aplicación móvil es totalmente confiable. Cabe destacar que se utilizará Excel para los análisis de resultados y las gráficas pertinentes, aprovechando esta equidad en los valores calculados entre las dos herramientas.

Capítulo 5

OPTIMIZACIÓN, VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS

5.1 Optimización de diseño

En este apartado se analizará cual es la mejor forma de optimizar el diseño de las columnas circulares de acero rellenas de hormigón, para esto se analizan 4 elementos base en los que se modifica en un 10% el diámetro, el espesor, la resistencia a compresión del hormigón y el límite elástico del acero, claro está, modificando una de estas variables y dejando constante las demás. Cabe destacar que la longitud y las fuerzas de cálculo no se variaron ya que no son significativas como las demás variables en lo que se refiere a resistencia seccional. De esta manera se podrá identificar que característica del elemento representa una mayor ganancia de resistencia para la optimización de un diseño. A continuación en la Figura 60 se muestra los elementos evaluados y las variaciones del 10% como se explicó anteriormente, con los 4 elementos base resaltados:

Datos de entrada							
Nº	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm2)	fyk (N/mm2)	Ned (KN)	Med (KNm)
1	350	5	2000	30	235	500	50
1.1	385	5	2000	30	235	500	50
1.2	350	5.5	2000	30	235	500	50
1.3	350	5	2000	33	235	500	50
1.4	350	5	2000	30	258.5	500	50
2	650	7	2000	40	235	1000	100
2.1	715	7	2000	40	235	1000	100
2.2	650	7.7	2000	40	235	1000	100
2.3	650	7	2000	44	235	1000	100
2.4	650	7	2000	40	258.5	1000	100
3	850	8	2000	40	355	5000	500
3.1	935	8	2000	40	355	5000	500
3.2	850	8.8	2000	40	355	5000	500
3.3	850	8	2000	44	355	5000	500
3.4	850	8	2000	40	390.5	5000	500
4	1000	10	1000	45	400	10000	1000
4.1	1100	10	1000	45	400	10000	1000
4.2	1000	11	1000	45	400	10000	1000
4.3	1000	10	1000	49.5	400	10000	1000
4.4	1000	10	1000	45	440	10000	1000

Figura 60 Elementos evaluados para identificar los datos de entrada más eficientes en la optimización.

Estos cuatro elementos base son lo suficientemente diversos como para evaluar los incrementos de resistencias tanto de fuerza axil como de momento flector y establecer que variable es más influyente para optimizar el diseño. El siguiente paso es calcular los

porcentajes de aumento de fuerza axil máxima y momento flector máximo, lo cuales están resumidos en la siguiente tabla:

Incremento en % de Fuerza Axil y Momento Flector Resistentes							
N°	Variable incrementada 10%	EC4		AISC360-10		Johansson	
		Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	d(mm)=350	t(mm)=5	l(mm)=2000	fck(N/m2)=30	fyk(N/m2)=235		
1.1	d	17.3%	22.4%	17.9%	22.3%	16.6%	23.2%
1.2	t	3.4%	8.7%	2.9%	8.7%	3.9%	9.4%
1.3	fck	6.2%	0.7%	6.7%	0.6%	5.5%	1.4%
1.4	fyk	3.8%	9.2%	3.3%	9.2%	3.2%	9.3%
2	d(mm)=650	t(mm)=7	l(mm)=2000	fck(N/m2)=40	fyk(N/m2)=235		
2.1	d	18.6%	21.7%	18.8%	23.2%	17.8%	23.3%
2.2	t	2.2%	9.1%	1.9%	10.0%	2.9%	9.9%
2.3	fck	7.5%	0.3%	7.8%	2.0%	6.7%	1.5%
2.4	fyk	2.5%	9.6%	2.0%	9.4%	2.2%	9.8%
3	d(mm)=850	t(mm)=8	l(mm)=2000	fck(N/m2)=40	fyk(N/m2)=355		
3.1	d	17.9%	22.0%	16.5%	22.6%	17.3%	23.3%
3.2	t	2.8%	9.0%	3.5%	10.0%	3.3%	9.6%
3.3	fck	6.9%	0.5%	7.3%	0.3%	6.4%	1.6%
3.4	fyk	3.1%	9.3%	1.3%	8.6%	2.8%	9.4%
4	d(mm)=1000	t(mm)=10	l(mm)=2000	fck(N/m2)=45	fyk(N/m2)=400		
4.1	d	17.8%	23.7%	16.1%	22.5%	17.2%	21.6%
4.2	t	2.9%	8.9%	3.9%	10.0%	3.4%	7.9%
4.3	fck	6.8%	1.9%	7.1%	1.9%	6.3%	0.2%
4.4	fyk	3.2%	9.3%	1.2%	10.0%	2.9%	7.9%

Figura 61 Tabla de incremento en % de la Fuerza Axil y Momento Flector Resistentes para evaluar eficiencia en optimización de diseño.

La tabla anterior (Figura 61), brinda la posibilidad de un amplio e importante análisis acerca de la optimización del diseño y el comportamiento de las columnas circulares de acero rellenas de hormigón, a continuación se plantean las consideraciones encontradas:

- El mayor aumento de resistencia tanto como para fuerza axil y momento flector, se alcanza incrementando el diámetro de la columna, con un promedio de aumento del 17.6% para el axil y 22.6% para el momento flector, sin embargo hay que tener en cuenta que el incremento del diámetro de la columna implica un aumento importante en las cantidades de obra que finalmente se traduce en altos costes y probablemente modificaciones de proyecto que requieren tiempo y por lo tanto más gastos. Se recomienda incrementar el diámetro sólo cuando las fuerzas de diseño

son muy superiores a las fuerzas resistentes, esta situación es detectada por la aplicación móvil y advierte al usuario que las dimensiones de la sección deben ser modificadas (Figura 62).

Warn! Design forces are too high to evaluate
the section with this procedure. Increase of
section dimensions or materials resistance is
requiered.

Figura 62 Advertencia al usuario de que las fuerzas de diseño son mucho más altas que las fuerzas resistentes.

- Con respecto al incremento del espesor del tubo de acero, cabe destacar que el diámetro exterior sigue constante pero el núcleo de hormigón se reduce, esta situación hace que el axil resistente aumente muy poco (2.9% en promedio), sin embargo el incremento en el momento flector resistente si es más notable promediando 9.3%, por lo tanto incrementar el espesor del tubo para obtener mayor resistencia a flexión es aconsejable, además que al aumentar el espesor del acero se reduce el hormigón a utilizar a diámetro exterior constante.
- Claramente el aumento de la resistencia a compresión afecta al incremento de la resistencia a fuerza axil (7.0% en promedio) mucho más que en el momento flector resistente (1.0% en promedio), esto se debe a que la resistencia a tensión del hormigón es despreciable en el EC4, la AISC360-10 y en Johansson para el cálculo de los CFT. Se recomienda aumentar la resistencia a compresión del hormigón para elementos que presenten problemas a fuerza axil. En el caso de la optimización de diseño, el aumento de f'_{ck} es más eficiente que el aumento del diámetro exterior en cuanto a costes y tiempo. Para este caso la aplicación móvil realiza la sugerencia de la Figura 63:

Ned/Nrd \leq 1.0: Design is correct for axial force.
Is recomendad an optimal design greater than
0.85. Increase concrete compressive strenght is
more effective than changing element diameter to
optimize the design.

Figura 63 Recomendación para la optimización del elemento con respecto a la fuerza axial.

- El aumento del límite elástico del acero implica al igual que en el aumento del espesor del tubo de acero una mejora importante en cuanto a momento flector resistente, incluso promedian igual (9.3%). Definir que es más eficiente para optimizar el diseño ya depende de la calidad y disponibilidad del acero que se

solicite, algunos proveedores tendrán a disposición varios espesores pero pocos tipos de acero, por lo tanto esto debe ser a criterio de cada proyectista. Generalmente el aumento de f_y cuesta menos, ya que el acero se vende por kilogramos, por lo tanto en la aplicación móvil se presenta la sugerencia de diseño de la Figura 64. El incremento en la fuerza axial resistente es sólo de 2.6% en promedio, situación razonable ya que las fibras de hormigón tensionadas no aportan a la resistencia a flexión.

Med/Mrd ≤ 1.0 : Design is correct for bending moment. Is recommended an optimal design greater than 0.85. Increase steel yield strength is more effective than changing tube thickness to optimize the design for bending moment.

Figura 64 Recomendación para la optimización del elemento con respecto al momento flector.

De esta manera se realizaron las comprobaciones para las consideraciones de diseño que se presentan en la aplicación móvil, brindando al usuario información de cómo actuar en diferentes circunstancias de diseño.

5.2 Validación del modelo de Johansson

El modelo de Johansson se propuso porque investigaciones previas (Chacón, R y otros, 2012) han demostrado que predice la capacidad de los CFT de manera más eficiente que la norma europea vigente (EC4) y a resultados experimentales realizados anteriormente.

La validación se realiza en dos etapas, la primera consiste en verificar la seguridad, para esto todos los cálculos realizados por el modelo de Johansson deben estar por debajo de las capacidades últimas de los resultados experimentales. La segunda etapa se trata de verificar que el modelo de Johansson se acerca más a los resultados experimentales que las normas EC4 y AISC360-10 de este modo el modelo de Johansson estaría del lado de la seguridad y más acertado en los resultados que los otros dos métodos.

En esta investigación se tomaron aleatoriamente 20 resultados experimentales de una base de datos recolectada por Chacón, R y otros (2012), así se justificará porque el modelo de Johansson es válido y seguro para el cálculo de las columnas circulares de acero rellenas de hormigón. A continuación en la Figura 65 se muestran los resultados experimentales y los calculados mediante Johansson, además de la relación N_{Joh}/N_{exp} que representa si el cálculo es menor al resultado experimental, para validar la seguridad.

Validación del modelo de Johansson										
Datos de entrada								Exp.	Joh.	N _{Joh} / N _{exp}
Nº	Autor	Año	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm ²)	fyk (N/mm ²)	Nult (KN)	Nmax (KN)	
1	Gardner N.	1968	168.8	2.64	305	34.7	302	1219	987.7	0.81
2	Cheng Y. et al.	1988	48	3.5	192	33.2	304	273	180.3	0.66
3	Han L.	2000	113.6	3.2	336	42.7	355	1139	536.6	0.47
4	Cai S. Jiao Z.	1984	166	5	660	29.62	274	1975	695.1	0.35
5	Cai S. Jiao Z.	1984	210	2.5	630	26.56	237	1637	1089.4	0.67
6	Han L. & Yao G.	2004	200	3	600	46.8	304	2160	1615.8	0.75
7	Tang G. et al.	1982	106	3	278	43.21	299	848	562.3	0.66
8	Han L. & Yao G.	2004	200	3	600	46.8	304	2160	1615.8	0.75
9	Zhong S.	1999	133.1	4.5	397	42.7	324	1440	1000.5	0.69
10	Bridge R. & O'Shea M.	1997	219	7	1420	38.2	273	3070	2316.2	0.75
11	Cai S. Jiao Z.	1984	166	5	1040	44.11	288	1695	1408.6	0.83
12	Fujii K.	1994	108	4	756	36.3	338	785	668.8	0.85
13	Zhang S.	2003	138.6	3.31	418	50	332	1490	996.6	0.67
14	Chapman J. Neogi P.	1966	168.4	4.52	813	43.8	302	2233	1399.4	0.63
15	Cai S. Jiao Z.	1984	273	8	1100	40.28	307	5194	3727.1	0.72
16	Tang G. et al.	1982	240	10	1440	49.8	269	5135	3486	0.68
17	Cai S. Jiao Z.	1984	96	5	405	39.53	411	1122	750.3	0.67
18	Fujii K.	1994	114	3.3	850	37	291	834	608.3	0.73
19	Sakino K. et al		100	0.52	200	37.4	244	396	246.8	0.62
20	SSRC Task group 20	1979	120.9	5.53	1050	21.1	343	1010	842.3	0.83
									Prom.:	0.69

Figura 65 Validación del modelo de Johansson por medio de resultados experimentales previos.

Claramente en la tabla anterior (Figura 65), se aprecia que el modelo de Johansson se encuentra por debajo de los axiles últimos de los resultados experimentales; en promedio se encuentra en un 69% de la carga última experimental. Es importante destacar que el modelo de Johansson se calculó teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad de los materiales característicos tanto como para el acero como para el hormigón. El Eurocódigo los establece en 1.15 para el acero y 1.5 para el hormigón, de esta manera se tiene en cuenta la probabilidad de defectos en los materiales utilizados, ya que por numerosos modelos que se estudien y se propongan siempre existe la posibilidad de desperfectos en los materiales que se salen de las manos del proyectista, por lo tanto se recomienda utilizar el método de Johansson para diseño CFT teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad de los materiales exigidos por el EC4.

Otro paso más en la validación del modelo de Johansson, es verificar que este se acerca más a los resultados experimentales que los otros dos métodos (EC4 y AISC360-10), para estos con los mismos elementos evaluados en la Figura 65, se establecen las relaciones N_{EC4}/N_{exp} y N_{AISC}/N_{exp} y se promedian, como lo muestra a continuación la Figura 66:

Validación del modelo de Johansson							
N°	Experimental	EC4	AISC360-10	Johansson	N_{EC4}/N_{exp}	N_{AISC}/N_{exp}	N_{Joh}/N_{exp}
	Nult (KN)	Nmax (KN)	Nmax (KN)	Nmax (KN)			
1	1219	847.71	831.34	987.76	0.70	0.68	0.81
2	273	158.57	142.79	180.35	0.58	0.52	0.66
3	1139	454.85	436.28	536.64	0.40	0.38	0.47
4	1975	599.54	570.09	695.18	0.30	0.29	0.35
5	1637	920.29	914.21	1089.42	0.56	0.56	0.67
6	2160	1413.06	1408.75	1615.8	0.65	0.65	0.75
7	848	478.64	459.49	562.36	0.56	0.54	0.66
8	2160	1413.06	1408.75	1615.8	0.65	0.65	0.75
9	1440	856.54	809.78	1000.5	0.59	0.56	0.69
10	3070	1947.31	1852.92	2316.27	0.63	0.60	0.75
11	1695	1195.41	1146.96	1408.64	0.71	0.68	0.83
12	785	574.18	534.43	668.89	0.73	0.68	0.85
13	1490	862.17	837.67	996.65	0.58	0.56	0.67
14	2233	1193.53	1149.54	1399.48	0.53	0.51	0.63
15	5194	3170.98	3022.28	3727.08	0.61	0.58	0.72
16	5135	2952.21	2806.58	3486	0.57	0.55	0.68
17	1122	663.94	604.22	750.32	0.59	0.54	0.67
18	834	513.87	489.3	608.26	0.62	0.59	0.73
19	396	226.25	214.85	246.88	0.57	0.54	0.62
20	1010	731.1	658.07	842.26	0.72	0.65	0.83
Promedio:					0.59	0.57	0.69

Figura 66 Comparación entre la exactitud de las normas EC4 y AISC360-10 con el modelo de Johansson.

En la tabla de la Figura 66, se observa que el modelo de Johansson se aproxima en promedio 69%, mientras que el EC4 un 59% y el AISC360-10 promedia un 57%, esto indica claramente que el modelo de Johansson además de estar verificado por el lado de la seguridad, también se acerca más que las normas vigentes, aunque el Eurocódigo confinado pueda alcanzar un poco de más resistencia está siempre está condicionada y limitada por numerosos factores.

5.3 Comparación de métodos y modelos

La utilización de dos normas (EC4 y AISC360-10) y un modelo (Johansson), brinda la posibilidad de realizar comparaciones entre estos y establecer conclusiones que aporten a futuras investigaciones o a la evaluación de las normas vigentes.

En este apartado se comparará cada procedimiento teniendo en cuenta los resultados de varios cálculos realizados, estableciendo las diferencias entre cada uno de ellos, soportado en gráficas que evidencian las tendencias entre los diferentes procedimientos, tomando como base la cuantía mecánica, además de la visualización general de la resistencia seccional con la presentación de diagramas de interacción que indica tendencias y comportamiento de cada procedimiento.

Para la comparación de los diferentes procedimientos, se realizó el cálculo de 40 elementos CFT para todos los métodos, las dimensiones de los elementos evaluados se variaron estratégicamente para alcanzar una diversidad de características que puedan indicar alguna tendencia o explicar el comportamiento y diferencias de los procedimientos.

Es necesario indicar que la fuerza axil y el momento flector de diseño se establecieron estratégicamente para que exista una relación e/d constante de 0.09, esto con el objetivo de poder comparar los resultados del Eurocódigo 4 confinado, ya que si el valor de esa relación supera 0.1, no se puede considerar confinamiento y los valores de fuerza axial máxima resistente serán iguales con o sin confinamiento, situación que imposibilita la inclusión del EC4 confinado en la comparación de los procedimientos.

La norma norteamericana AISC360-10 no se ve afectada por la variación de la fuerza axil y el momento flector de diseño, ya que para incluir o no el efecto de confinamiento del hormigón por parte del tubo de acero, sólo se basa en la relación d/t , sin tener en cuenta las fuerzas de cálculo.

El modelo de Johansson tampoco se ve influenciado por el cambio en la fuerza axil y el momento flector de diseño, ya que este incluye el confinamiento del hormigón por parte del tubo de acero mediante la propuesta de un modelo de comportamiento del hormigón explicado en el apartado 3.3, modelo que no depende de las fuerzas de cálculo.

A continuación en la Figura 67, se exponen los elementos calculados con sus respectivas dimensiones, las resistencias de los materiales, la fuerza axil y el momento flector de diseño, la relación e/d , y la cuantía mecánica (δ). Posteriormente en la Figura 68, se presenta la tabla en donde se comparan los resultados entre los diferentes métodos, basados en la relación de las fuerzas axiales resistentes calculadas para apreciar tendencias y la construcción posterior de gráficos que amplíen la comprensión del comportamiento de cada procedimiento.

Elementos CFT calculados para comparación de métodos y modelos									
Datos de entrada									
Nº	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm ²)	fyk (N/mm ²)	N (KN)	M (KNm)	e/d	δ
1	450	5	2000	30	235	3000	121.5	0.09	0.32
2	450	7	2000	40	355	3800	153.9	0.09	0.43
3	500	5	2000	30	460	4600	207	0.09	0.45
4	500	7	2000	40	235	5400	243	0.09	0.31
5	550	5	2000	30	355	6200	306.9	0.09	0.37
6	550	7	2000	40	460	7000	346.5	0.09	0.44
7	600	6	2000	30	235	7800	421.2	0.09	0.30
8	600	8	2000	40	355	8600	464.4	0.09	0.39
9	650	6	2000	30	460	9400	549.9	0.09	0.43
10	650	8	2000	40	235	10200	596.7	0.09	0.28
11	700	6	2000	30	355	11000	693	0.09	0.35
12	700	8	2000	40	460	11800	743.4	0.09	0.42
13	750	6	2000	30	235	12600	850.5	0.09	0.25
14	750	8	2000	40	355	13400	904.5	0.09	0.34
15	800	7	2000	30	460	14200	1022.4	0.09	0.42
16	800	9	2000	40	235	15000	1080	0.09	0.26
17	850	7	2000	30	355	15800	1208.7	0.09	0.34
18	850	9	2000	40	460	16600	1269.9	0.09	0.40
19	900	10	2000	30	235	17400	1409.4	0.09	0.32
20	900	12	2000	40	355	18200	1474.2	0.09	0.39
21	350	5	2000	30	235	1500	42	0.09	0.38
22	385	5	2000	30	235	1500	46.2	0.09	0.36
23	350	5.5	2000	30	235	1500	42	0.09	0.40
24	350	5	2000	33	235	1500	42	0.09	0.36
25	350	5	2000	30	258.5	1500	42	0.09	0.40
26	650	7	2000	40	235	6000	312	0.09	0.25
27	715	7	2000	40	235	6000	343.2	0.09	0.24
28	650	7.7	2000	40	235	6000	312	0.09	0.27
29	650	7	2000	44	235	6000	312	0.09	0.24
30	650	7	2000	40	258.5	6000	312	0.09	0.27
31	850	8	2000	40	355	12000	816	0.09	0.31
32	935	8	2000	40	355	12000	897.6	0.09	0.29
33	850	8.8	2000	40	355	12000	816	0.09	0.33
34	850	8	2000	44	355	12000	816	0.09	0.29
35	850	8	2000	40	390.5	12000	816	0.09	0.33
36	1000	10	1000	45	400	24000	1920	0.09	0.32
37	1100	10	1000	45	400	24000	2112	0.09	0.30
38	1000	11	1000	45	400	24000	1920	0.09	0.35
39	1000	10	1000	49.5	400	24000	1920	0.09	0.30
40	1000	10	1000	45	440	24000	1920	0.09	0.34

Figura 67 Características de elementos evaluados para comparación de métodos y modelos.

Comparación de resultados de fuerza axial							
Nº	e/d	δ	N_{EC4}/N_{AISC}	N_{EC4}/N_{Joh}	$N_{EC4Conf.}/N_{AISC}$	$N_{EC4Conf.}/N_{Joh}$	N_{AISC}/N_{Joh}
1	0.09	0.32	1.00	0.86	1.01	0.87	0.86
2	0.09	0.43	1.02	0.87	1.04	0.89	0.85
3	0.09	0.45	1.08	0.89	1.10	0.91	0.82
4	0.09	0.31	1.00	0.86	1.01	0.87	0.86
5	0.09	0.37	1.04	0.88	1.06	0.90	0.85
6	0.09	0.44	1.05	0.89	1.07	0.91	0.85
7	0.09	0.30	0.99	0.86	1.01	0.87	0.87
8	0.09	0.39	1.02	0.88	1.03	0.89	0.86
9	0.09	0.43	1.10	0.89	1.12	0.91	0.81
10	0.09	0.28	0.99	0.87	1.00	0.88	0.88
11	0.09	0.35	1.05	0.89	1.07	0.90	0.84
12	0.09	0.42	1.05	0.89	1.07	0.91	0.85
13	0.09	0.25	0.99	0.88	1.01	0.89	0.88
14	0.09	0.34	1.02	0.89	1.04	0.90	0.87
15	0.09	0.42	1.12	0.89	1.14	0.91	0.80
16	0.09	0.26	0.99	0.87	1.00	0.88	0.88
17	0.09	0.34	1.06	0.89	1.07	0.90	0.84
18	0.09	0.40	1.06	0.90	1.09	0.92	0.84
19	0.09	0.32	1.00	0.86	1.01	0.87	0.86
20	0.09	0.39	1.02	0.88	1.04	0.90	0.86
21	0.09	0.38	1.01	0.84	1.02	0.85	0.83
22	0.09	0.36	1.00	0.85	1.02	0.86	0.84
23	0.09	0.40	1.01	0.84	1.03	0.85	0.83
24	0.09	0.36	1.00	0.85	1.02	0.86	0.84
25	0.09	0.40	1.01	0.85	1.03	0.86	0.83
26	0.09	0.25	0.98	0.88	1.00	0.89	0.89
27	0.09	0.24	0.98	0.88	0.99	0.89	0.90
28	0.09	0.27	0.99	0.87	1.00	0.88	0.88
29	0.09	0.24	0.98	0.88	0.99	0.89	0.90
30	0.09	0.27	0.99	0.88	1.00	0.89	0.89
31	0.09	0.31	1.03	0.89	1.04	0.91	0.87
32	0.09	0.29	1.04	0.90	1.06	0.91	0.86
33	0.09	0.33	1.02	0.89	1.04	0.90	0.87
34	0.09	0.29	1.02	0.90	1.04	0.91	0.88
35	0.09	0.33	1.05	0.90	1.06	0.91	0.86
36	0.09	0.32	1.04	0.90	1.06	0.92	0.87
37	0.09	0.30	1.05	0.90	1.07	0.92	0.86
38	0.09	0.35	1.03	0.90	1.05	0.91	0.87
39	0.09	0.30	1.04	0.90	1.05	0.92	0.87
40	0.09	0.34	1.06	0.90	1.08	0.92	0.85

Figura 68 Tabla para comparación de resultados de fuerza axial.

De la tabla de la Figura 67, se puede apreciar cómo se varía el momento de cálculo dependiendo del axil, de esta manera se puede obtener una relación constante e/d de 0.09 para poder incluir en la comparación al Eurocódigo 4 confinado como se había explicado anteriormente. También se aprecia la diversidad de las cuantías mecánicas de los elementos calculados, esto con el fin de establecer posteriormente conclusiones acerca de las tendencias encontradas en los resultados.

En la tabla de la Figura 68, ya se pueden apreciar algunas tendencias de comparación entre los procedimientos. A continuación se explican las observaciones pertinentes de cada relación N_i/N_j :

- **N_{EC4}/N_{AISC} :** De esta relación se observa que los resultados son muy cercanos entre sí, los valores varían entre 0.98 y 1.12, no existe una diferencia muy marcada de la fuerza axil máxima resistente entre el Eurocódigo 4 sin confinamiento y la AISC360-10, sin embargo si se aprecia que en la mayoría de los resultados el EC4 es ligeramente mayor.
- **N_{EC4}/N_{Joh} :** En esta comparación, es claramente visible que Johansson llega a una fuerza axil máxima resistente mayor que el Eurocódigo 4 sin confinamiento, con una relación que varía entre 0.84 y 0.9. Cabe destacar que para el cálculo de Johansson se aplicaron los coeficientes de seguridad para los materiales indicados por el EC4, lo que hace al modelo comparable. Además, la validación del modelo de Johansson estableció que este se encuentra por debajo de los resultados experimentales, situaciones que justifican la utilización del modelo de Johansson.
- **$N_{EC4Conf}/N_{AISC}$:** Para esta relación, se amplía un poco la diferencia entre los métodos europeos y norteamericanos, al permitir confinamiento en el EC4 la fuerza axil máxima resistente aumenta, brindando la posibilidad de realizar diseño un poco más óptimos, sin embargo el confinamiento permitido por el EC4 depende de la relación e/d , por lo tanto las fuerzas de diseño desempeñan un papel importante en el incremento de la fuerza axil máxima resistente, situación limitante para establecer que un método es más exacto que otro.
- **$N_{EC4Conf}/N_{Joh}$:** Al comparar el EC4 confinado con el modelo de Johansson, se aprecia que aunque debido al confinamiento el EC4 aumenta un poco la fuerza axil máxima resistente, las relaciones varían entre 0.85 y 0.92, no llegan a superar al modelo de Johansson, pero al igual que en la comparación pasada ($N_{EC4Conf}/N_{AISC}$), el confinamiento depende de e/d , por lo tanto aún no se puede establecer conclusiones contundentes que identifiquen alguno de los métodos como más eficiente para el diseño de CFT.

- N_{AISC} / N_{Joh} : De esta relación, se aprecia que el modelo de Johansson calcula fuerzas axiales máximas resistentes mayores que la norma AISC360-10, las relaciones varían entre 0.8 y 0.9, por lo tanto, con en este análisis inicial se puede sugerir que el modelo de Johansson es más preciso que la norma AISC360-10 en cuanto a predicción de fuerza axial máxima resistente se refiere.

Las anteriores comparaciones es un inicio para el análisis del comportamiento y las tendencias de cada procedimiento, es por eso que ahora se analizarán las graficas de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_i/N_j), de esta manera si se podrán establecer tendencias y análisis más completos.

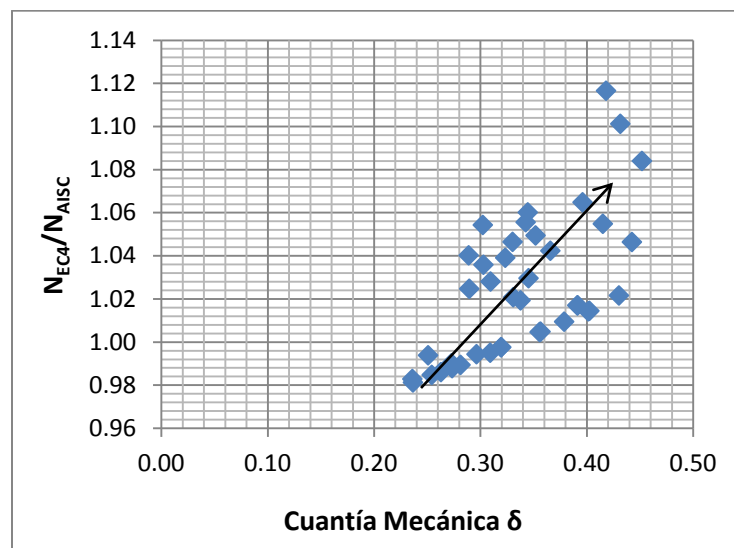


Figura 69 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{EC4}/N_{AISC}).

Del gráfico de la Figura 69, se puede observar una tendencia marcada, que para cuantías mecánicas pequeñas, el EC4 es prácticamente igual a la norma americana AISC360-10, a medida que existe más contribución del acero, el Eurocódigo4 se empieza a alejar de la norma norteamericana y la diferencia entre valores se acrecienta. La explicación a este incremento entre los dos procedimientos se puede explicar apuntando que en la norma AISC360-10 la clasificación de Compacta y No compacta depende de límites que incluyen el límite elástico del acero en sus fórmulas (Ver Figura 26 y 27), lo que hace que una mayor contribución del acero modifique estos límites restringiendo la inclusión del confinamiento o no. Por lo tanto teniendo en cuenta la Figura 69, se puede establecer que el Eurocódigo4 puede llegar a ser más eficiente que la norma norteamericana para contribuciones altas del acero, es decir cuantías mecánicas (δ) de valores altos.

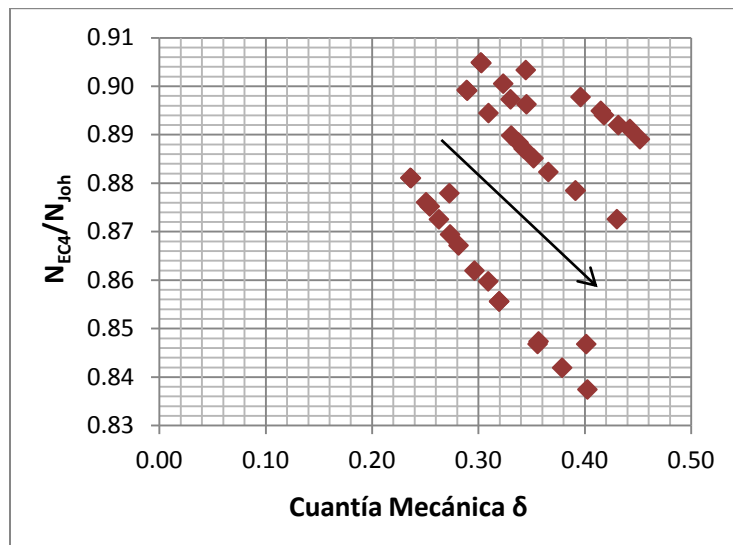


Figura 70 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{EC4}/N_{Joh}).

En la Figura 70, se aprecia en el gráfico que efectivamente el modelo de Johansson calcula axiles más altos que el Eurocódigo4, y que a medida que aumenta la contribución del acero, la diferencia entre un procedimiento y el otro varía muy poco, lo que indica cierta continuidad en el comportamiento de estos dos métodos en la variación de la cuantía mecánica. Además, es otro indicio de que el método de Johansson predice mejor la fuerza axil máxima resistente que el EC4 sin confinamiento, teniendo en cuenta que ya se realizó la validación del modelo de Johansson.

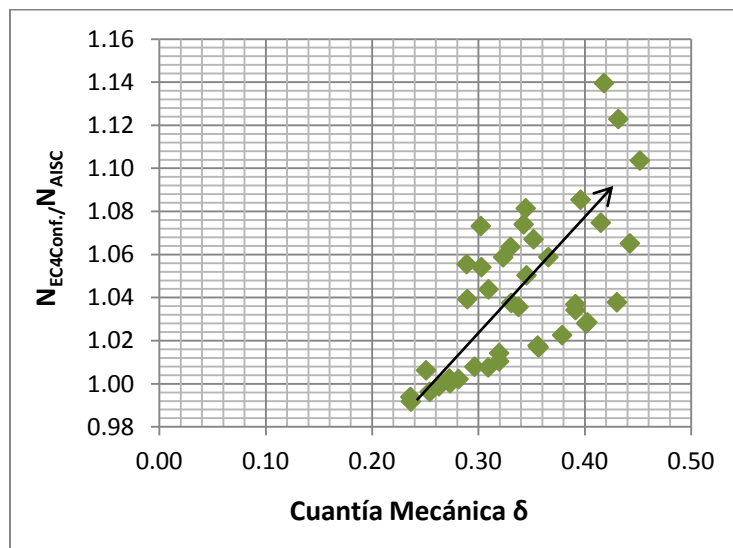


Figura 71 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles ($N_{EC4Conf.}/N_{AISC}$).

En el gráfico de la Figura 71, se observa una clara tendencia en donde el EC4 confinado se aleja de la AISC360-10. A cuantías mecánicas pequeñas los valores llegan a ser un poco

similares, pero el aumento de la contribución del acero hace otra vez que los límites de la clasificación de elementos Compactos y No Compactos por parte de la norma norteamericana se vean afectados y el confinamiento no se pueda incluir. Además, a mayor espesor del tubo de acero o mayor límite elástico, se produce un mayor confinamiento y por lo tanto mayor fuerza axial máxima resistente (Ver ec. 3.5). De este análisis se puede sugerir que el EC4 confinado puede predecir mejor la capacidad a compresión que la norma AISC-360-10, siempre y cuando la relación e/d permita un confinamiento importante.

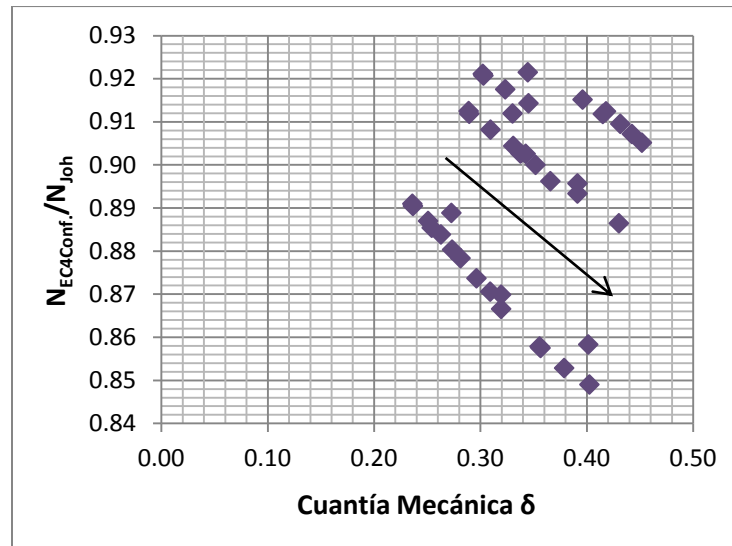


Figura 72 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles ($N_{EC4Conf.}/N_{Joh}$).

En la Figura 72, se puede observar que los valores calculados por el modelo de Johansson son mayores que el EC4 confinado en toda la gráfica, sin embargo la tendencia de variación indica que a mayor contribución del acero el EC4 confinado se irá aproximando al modelo de Johansson. Este hecho tiene sentido físico, ya que cálculos previos han resultado con valores de axiles máximos resistentes mayores en el EC4 confinado que en Johansson, esta situación se puede dar con relaciones e/d bajas que aumentan el efecto de confinamiento del núcleo del hormigón por parte del tubo de acero, tanto que investigaciones previas (Chacón y otros, 2012) han demostrado que existen elementos que se encuentran por el lado de la inseguridad con valores mayores que los obtenidos experimentalmente, por lo tanto el análisis sugiere que el modelo de Johansson sigue siendo el más efectivo a la hora de calcular CFT.

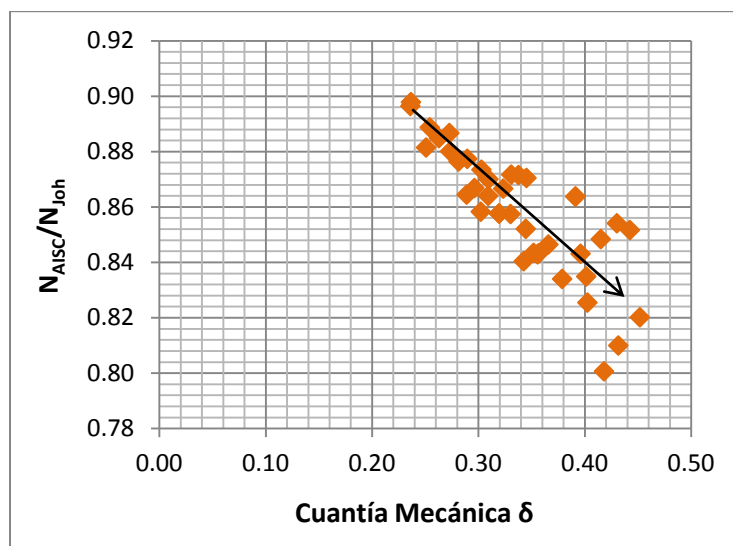


Figura 73 Gráfico de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_{AISC}/N_{Joh}).

De la Figura 73, se observa una clara tendencia de que el modelo de Johansson es aleja más de la norma norteamericana a medida que la contribución del acero aumenta con una tendencia de variación marcada. Esto indica otra vez que la limitante de las restricciones para la clasificación de CFT entre Compacta y No Compacta, se ve afectada directamente con el límite elástico del acero, el cual también está presente en el cálculo de la cuantía mecánica, motivo que intensifica más la idea del modelo de Johansson como el más efectivo entre los procedimientos evaluados.

El siguiente análisis contempla la visualización de los diferentes diagramas de interacción que se generan a partir de los 40 elementos CFT evaluados expuestos en la Figura 67. Se expondrán los diagramas más representativos que permitan analizar el comportamiento de la resistencia seccional de los CFT en general y por todos los procedimientos expuestos en este estudio.

Los elementos elegidos para exponer y analizar sus respectivos diagramas de interacción son los siguientes, identificados con el N° correspondiente de la Figura 67:

Elementos para analizar su diagrama de interacción (M-N)									
Datos de entrada									
N°	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm2)	fyk (N/mm2)	N (kN)	M (kNm)	e/d	δ
1	450	5	2000	30	235	3000	121.5	0.09	0.32
10	650	8	2000	40	235	10200	596.7	0.09	0.28
17	850	7	2000	30	355	15800	1208.7	0.09	0.34
36	1000	10	1000	45	400	24000	1920	0.09	0.32

Figura 74 Tabla de elementos elegidos para analizar su respectivo diagrama de interacción (M-N)

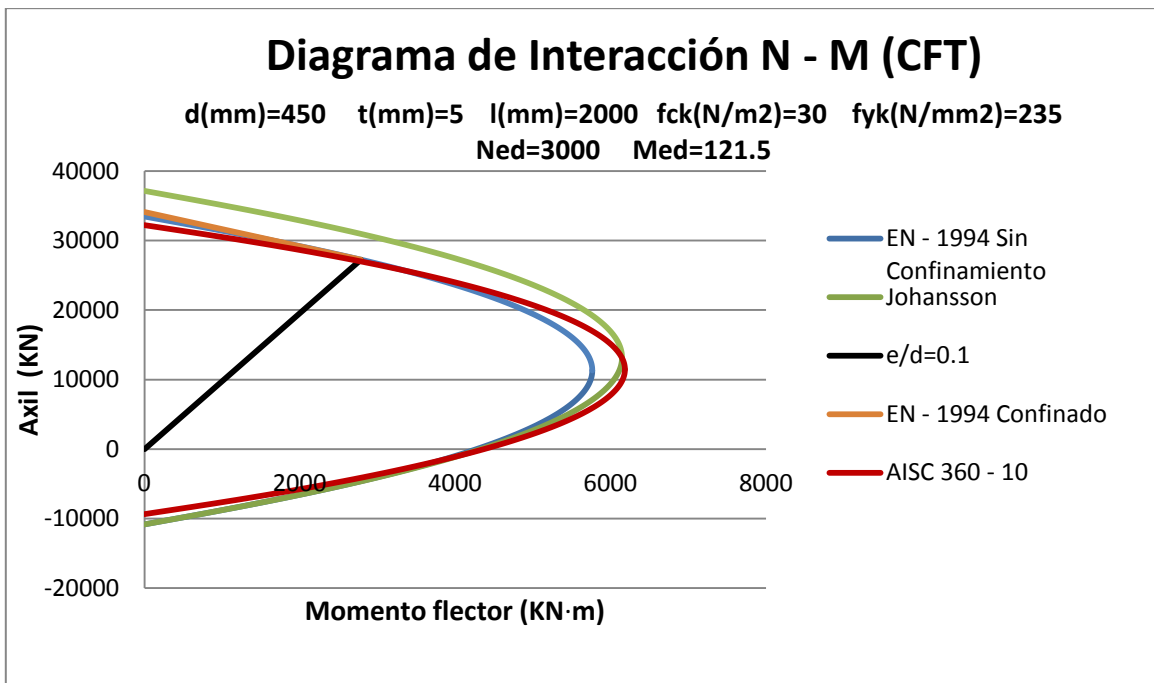


Figura 75 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.

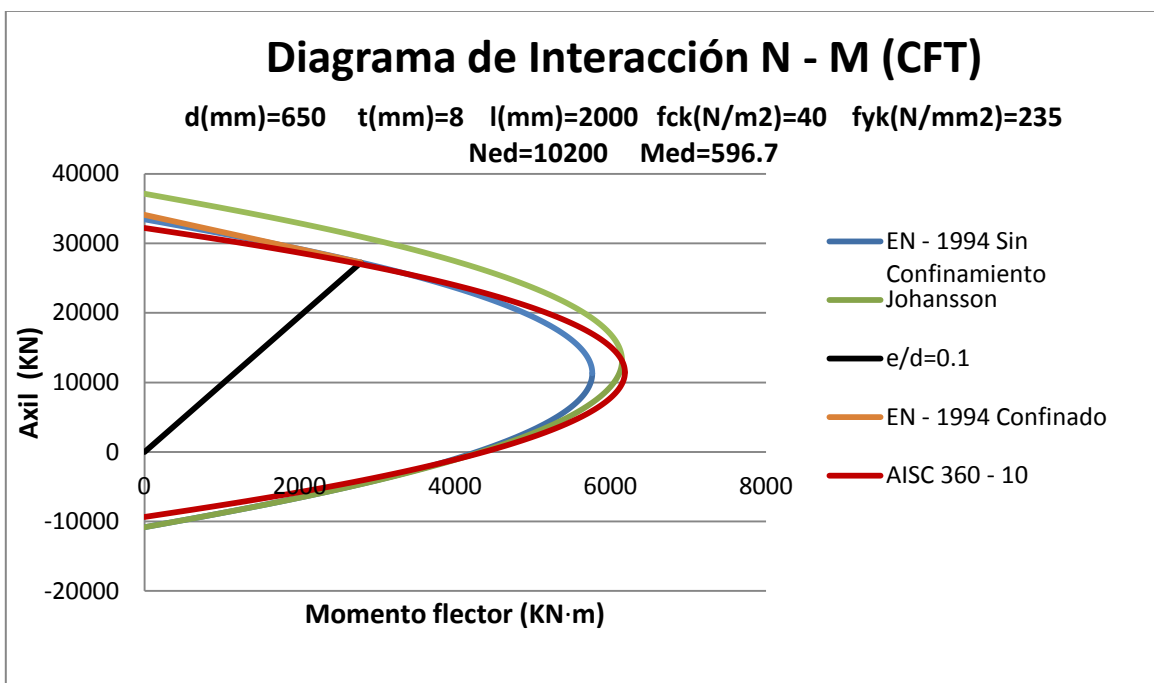


Figura 76 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.

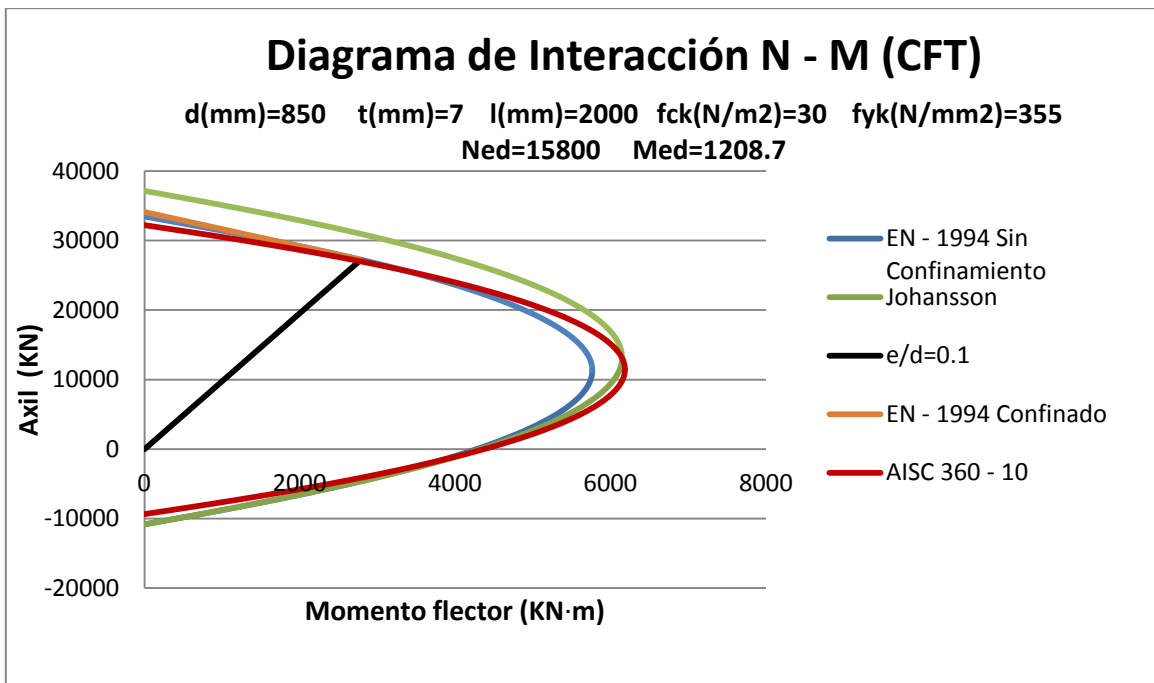


Figura 77 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.

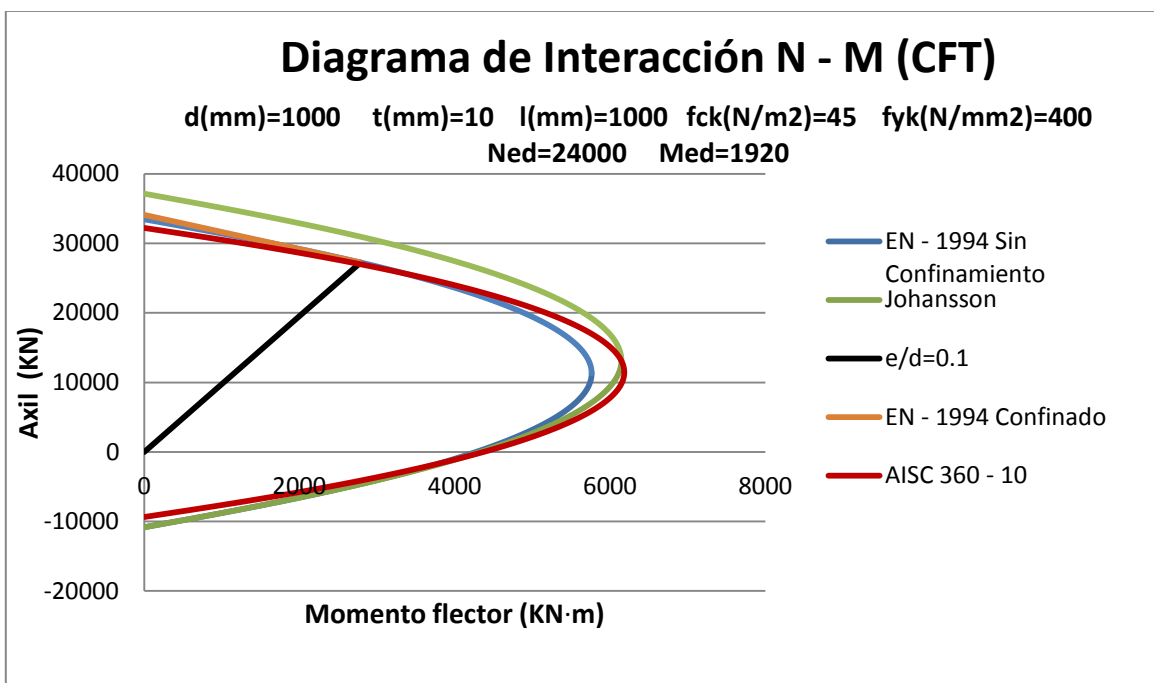


Figura 78 Diagrama de interacción (M - N) para el CFT respectivo.

De los diagramas de interacción anteriores, se exponen los siguientes análisis que complementan el estudio del comportamiento de la resistencia seccional de los CFT en los métodos estudiados:

- Congruente con los análisis anteriores, efectivamente el modelo de Johansson es el que predice las fuerzas axiales máximas resistentes con más exactitud, ya que los valores son los más altos y este se encuentra por debajo de los resultados experimentales, es decir del lado de la seguridad. Esta diferencia aumenta cada vez más en elementos menos esbeltos, ya que en los tres primeros diagramas la longitud del elemento es constante, varían sólo el diámetro y el espesor, esto demuestra que en elementos más compactos el modelo de Johansson se separa más de las normas evaluadas, situación que también se presentaba en los gráficos de cuantía mecánica (δ) vs las relaciones de axiles (N_i/N_j).
- En estos diagramas, la diferencia entre el diagrama de EC4 sin y con confinamiento es mínima, esto se debe a que la relación e/d fue de 0.09 para todos los elementos, y el límite es 0.1, por lo tanto al evaluar CFT con relaciones e/d más pequeñas si podrán observar diferencias mayores entre un procedimiento y el otro. Debido a esta situación se debe indicar que el cálculo de los CFT mediante el Eurocódigo4 depende directamente de las fuerzas de cálculo, situación que hace inestable el procedimiento, una alternativa a esto es aprobar modelos para el hormigón y el acero que tengan en cuenta el efecto de confinamiento sin depender de las fuerzas de diseño, como el caso del modelo de Johansson que se comporta adecuadamente y posee una base teórica sólida.
- Es de destacar, que el método de cálculo mediante la norma AISC360-10, presenta diagramas en donde las fuerzas axiales calculadas son menores que los demás procedimientos, sin embargo los momentos flectores son mayores, esto se explica debido a que esta norma indica que la resistencia a compresión disponible para diseño es del 75% de lo calculado, mientras que para la resistencia a flexión lo amplían a 90%, esto tiene una incidencia directa en el diagrama de interacción, y es por eso que se aprecia esta tendencia. Esta diferencia tan drástica desmerita la precisión del método, el cual podría diseñar con más eficiencia a flexión que a compresión, dando pie a que el modelo de Johansson se considerado una vez más como una alternativa viable para el estudio y diseño de los CFT.

Al concluir los análisis de los diagramas de interacción, se complementan las hipótesis planteadas en los análisis anteriores y se posee información sólida que permita establecer las conclusiones definitivas de esta investigación.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de una nueva herramienta (aplicación móvil) para el diseño de pilas circulares de acero rellenas de hormigón por medio de tres métodos distintos, genera la posibilidad de realizar numerosos análisis acerca del comportamiento de estos elementos y las tendencias que se van marcando en cada uno de los procedimientos. A continuación se exponen las conclusiones finales de esta investigación, no sólo teniendo en cuenta las comparaciones de los métodos, sino también todo el desarrollo de este estudio, desde las informaciones iniciales del Estado del Arte, pasando por el proceso de programación en App Inventor y culminando con los análisis de resultados realizados.

6.1 Conclusiones relativas a los CFT

- Actualmente las pilas CFT si son elementos utilizados en todo el mundo en diferentes proyectos, desde puentes, construcciones residenciales, edificios públicos, entre otros, por lo tanto contar con un diseño óptimo es fundamental para conseguir estructuras económicas, seguras y funcionales. Esta realidad justifica aún más la realización de esta investigación.
- Existen numerosos estudios que pretenden predecir la capacidad seccional de los CFT, sin embargo muchos de estos se limitan a formular ecuaciones experimentales que no explican el verdadero comportamiento de las pilas circulares de acero rellanas de hormigón. Existen investigaciones previas que proponen métodos basados en modelos de comportamiento del hormigón y del acero que intentan dar un sentido físico al cálculo, pero varios de estos estudios pueden encontrarse del lado de la inseguridad como es el caso de Hatzigeorgiu, que aunque su hipótesis es completa y bien argumentada en algunos cálculos realizados por este método superan a resultados experimentales de otras investigaciones.

6.2 Conclusiones relativas a la Aplicación Móvil

- La programación en la plataforma online de MIT App Inventor, posee una interfaz amigable en la que la construcción de algoritmos y la creación del espacio gráfico de la aplicación pueden realizarse mediante la interacción de bloques y comandos previamente constituidos. Uno de los problemas que se puede llegar a tener programando en App Inventor, es que al ser una plataforma en línea depende mucho de la calidad de la conexión a internet, si esta no es buena se puede tornar un

poco lento el programa. Con proyectos de alta sollicitación matemática y con la inclusión de gran cantidad de variables, como en este caso, la plataforma puede entorpecerse un poco. Es recomendable tener muy claro la envergadura del proyecto que se quiere desarrollar para verificar si la plataforma puede desenvolverse lo suficientemente bien como para culminar el proyecto sin mayores inconvenientes.

- La funcionalidad de la aplicación ya instalada en los dispositivos móviles se desarrolla de muy buena manera, y puede ser soportada por dispositivos que no estén a la vanguardia de la tecnología. Al iniciar el cálculo del diagrama de interacción, es necesario realizar unas 600 iteraciones, en donde cada una de ellas incluye numerosos cálculos del método iterativo por fibras, además del cálculo de las propiedades iniciales como el área del acero o la excentricidad, esto justifica el hecho de que desde el inicio del cálculo hasta la construcción del diagrama de interacción de los tres métodos tarde alrededor de 36 segundos en realizarse en el móvil, esto puede variar dependiendo de cada aparato, sin embargo es un tiempo razonable de espera comparado con la información de resultados que proporciona la aplicación *CFT Optimal Design*.

6.3 Conclusiones relativas a los métodos programados

- **EC4 vs AISC360-10:** Entre estos métodos se pueden realizar comparaciones, sin embargo los resultados a los que ambos llegan son muy similares, esto es un claro indicio de que las normas vigentes tratan el cálculo de CFT desde un punto de vista muy conservador, ya que se centran en la capacidad seccional como la suma de las contribuciones del hormigón y el acero, haciendo que el fenómeno de confinamiento del hormigón por parte del tubo de acero se incluya someramente. En el AISC360-10 la única diferencia es aumentar el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón de un 70% a un 95% dependiendo de la relación d/t para calificar los elementos en Compactos y No Compactos. Por otro lado el EC4 puede que realice un análisis un poco más profundo sobre el confinamiento del núcleo de hormigón, sin embargo depende directamente de la fuerza axial y el momento flector de diseño, no es un método totalmente sólido, las fuerzas de diseño no son modificables y si estas no permiten considerar el confinamiento del hormigón no existe otra posibilidad para incluirlo utilizando el Eurocódigo4. Por lo tanto la utilización de un método u otro no va a alterar en gran medida el diseño, lo que sí cabe apuntar es que la AISC360-10 plantea que la capacidad a compresión disponible es del 75% mientras que la de flexión es de 90%, esto indica que al

presentarse un problema estructural con altas demandas de flexión es mejor utilizar la norma norteamericana, además que al tener momentos flectores altos la excentricidad será menor y menos confinamiento se producirá utilizando el EC4.

- **EC4 vs Johansson:** Como punto de partida, se puede establecer que el sólo hecho de que Johansson se base un modelo teórico sólido para el fenómeno del confinamiento del núcleo de hormigón por parte del tubo de acero, hace que este método inicie con ventaja respecto al EC4. Los resultados obtenidos muestran que Johansson predice de forma más efectiva la capacidad seccional de CFT sometidos a flexocompresión, obtiene valores mayores tanto para compresión como para flexión y siempre del lado de la seguridad. El confinamiento que permite el EC4 puede alcanzar valores de fuerza axial máxima resistente muy altos, hasta parecerse un poco a los de Johansson, sin embargo este confinamiento siempre va a depender de la excentricidad en las cargas, y sólo se permite hasta una relación e/d de 0.1, por lo tanto con elementos que presenten momentos flectores importantes el EC4 nunca va a acercarse al modelo de Johansson. Es interesante indicar que la comparación de estos métodos es la que menos presenta variación en la gráfica de cuantía mecánica (δ) vs N_i/N_j , para el EC4 con y sin confinamiento, lo que apunta a establecer que aunque la contribución del acero aumente estos dos métodos no presentarán acercamientos importantes en los resultados de cálculo. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la utilización del modelo de Johansson se recomienda por encima del EC4, siempre y cuando se apliquen los coeficientes de seguridad para los materiales propuestos por el EC4.
- **AISC360-10 vs Johansson:** Al igual que para el EC4, el AISC360-10 inicia con la desventaja de no contar con un modelo para el fenómeno del confinamiento del núcleo de hormigón por parte del tubo de acero. Los resultados con el modelo de Johansson para las fuerzas axiales máximas permitidas están claramente por encima de las obtenidas con la norma norteamericana. Respecto a los resultados obtenidos para los momentos flectores máximos resistentes, los valores si son muy parecidos entre sí, estos se debe a que el AISC360-10 establece que la resistencia a flexión disponible es del 90% a la calculada, mientras que para compresión es del 75%, por lo tanto amplía el rango de los resultados. Esta diferencia entre los resultados a compresión y a flexión en la norma norteamericana hace notar que el método es inestable y no se basa en modelos sólidos para la predicción de la capacidad seccional. Respecto a la contribución del acero, se muestra una tendencia clara en Johansson a aumentar la diferencia respecto al AISC360-10 mientras la cuantía mecánica sea mayor. Por estas consideraciones, se recomienda utilizar el modelo de Johansson para el diseño de CFT por encima de la norma norteamericana, siempre y

cuando se utilicen los coeficientes de seguridad para los materiales propuestos por el EC4 en el modelo de Johansson.

Finalmente, es importante destacar que el confinamiento del núcleo de hormigón por parte del tubo de acero es un fenómeno que varios científicos alrededor del mundo han tratado de estudiar, pero que aún queda mucho por saber de este problema estructural. Actualmente el uso del modelo de Johansson para el diseño de CFT es uno de los métodos que más se ha acercado al comportamiento real de estos elementos, por lo tanto se recomienda emplearlo, situación que abre la puerta a la implementación de la aplicación desarrollada (*CFT Optimal Design*).

REFERENCIAS

AISC "American Institute of Steel Construction". (2010). *Specification for Steel Structural Buildings*. Chicago, Illinois: ANSI/AISC.

Attard, M & Setunge, S. (1996). Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete. *ACI Materials Journal*, 93(5). <http://dx.doi.org/10.14359/9847>.

Beetle Blocks. (2016) - *Visual code for 3D design*. *Beetleblocks.com*. Retrieved 2 April 2016, from <http://beetleblocks.com/>.

Cai S. H., Jiao Z. S. (1984) Behavior and ultimate strength of short concrete - filled steel tubular columns. *Journal of Building Structures*, Vol. 1984 (6) pp. 13-29, (en chino).

CEN. "European Committee of Standardization" Eurocode 2: Design of concrete structures [Libro]. - Brussels: CEN, 2004.

CEN. "European Committee of Standardization" Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures [Libro]. - Brussels: CEN, 2004.

CEN. "European Committee of Standardization" Eurocode 3: Design of steel structures [Libro]. - Brussels: CEN, 2005.

Chacón, R., Mirambell, E., & Real, E. (2012). Capacidad resistente de pilas metálicas tubulares circulares rellenas de hormigón (CFT) en puentes integrales. *Informes De La Construcción*, 64(527), 355-370. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.11.098>.

Chacón, R., Mirambell, E., & Real, E. (2012). Local buckling in Concrete-Filled circular Tubes (CFT). *Tubular Structures XIV*, 35-42. <http://dx.doi.org/10.1201/b13139-8>.

Chacón, R., Mirambell, E., & Real, E. (2013). Strength and ductility of concrete-filled tubular piers of integral bridges. *Engineering Structures*, 46, 234-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.026>.

Chang, X., Fu, L., Zhao, H., & Zhang, Y. (2013). Behaviors of axially loaded circular concrete-filled steel tube (CFT) stub columns with notch in steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 73, 273-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.018>.

Charalampakis, A. & Koumousis, V. (2008). Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load. *Advances In Engineering Software*, 39(11), 923-936. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.01.007>.

Cheng Y., Xu F., Xu Z., Xu X. (1988). Experimental research on dynamic behaviour of basic concrete filled steel tubular elements. Proceedings 2nd ASCCS International Conference on Steel - Concrete Composite Structures, Harbin, China, pp. 137- 144.

Ding, F., Liu, J., Liu, X., Yu, Z., & Li, D. (2014). Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression. *Thin-Walled Structures*, 94, 155-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.04.020>.

F, Martínes. (2013). Análisis de la capacidad seccional a flexión de pilas tubulares metálicas rellenas de hormigón [Tesis de Grado]. *Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela de Caminos, Canales y Puertos*.

Farley, J. (2011). *Manette Bridge Construction / The Commute*. *Pugetsoundblogs.com*. Retrieved 11 December 2015, from <http://pugetsoundblogs.com/commute/category/manette-bridge-construction-videos/>.

Fujii, K., (1994). Structural Behavior of two types of mortar filled steel tubes. Proceedings 4th International Conference on Composite Construction, Kosice, Slovakia, pp. 194-197.

Gardner N. J., (1968). Use of spiral welded steel tubes in pipe columns. *ACI Journal*, Vol 65 (11), pp. 937-942.

GmbH, E. (2015). *Republic Plaza, Singapore / 106403 / EMPORIS*. *Emporis.com*. Retrieved 24 January 2016, from <http://www.emporis.com/buildings/106403/republic-plaza-singapore-singapore>.

Han L., Yao G., (2004). Experimental behavior of thin - walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Thin-Walled Structures* Vol. 42, pp. 1357-1377.

Han L., (2000). The influence of concrete compaction on the strength of concrete filled steel tubes. *Advances in Structural Engineering*, Vol 3 (2), pp. 131-137.

Hatzigeorgiou, G. (2008). Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, Part I: Theory. *Engineering Structures*, 30(6), 1573-1578. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.11.001>.

Hatzigeorgiou, G. (2008). Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, Part II: Verification and extension. *Engineering Structures*, 30(6), 1579-1589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.11.002>.

Johansson, M. & Gylltoft, K. (2002). Mechanical Behavior of Circular Steel–Concrete Composite Stub Columns. *Journal Of Structural Engineering*, 128(8), 1073-1081. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:8\(1073\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:8(1073)).

Johansson, M. (2002). The efficiency of confinement in CFT columns. *Steel And Composite Structures*, 2(5), 379-396. <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2002.2.5.379>.

Johansson, M., & Akesson, M. (2002). Finite Element Study of Concrete-Filled Steel Tubes Using a New Confinement-Sensitive Concrete Compression Model [Ph. D. Research]. *Research Assistant Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology*.

Lai, Z. & Varma, A. (2014). Noncompact and slender circular CFT members: Experimental database, analysis, and design. *Journal Of Constructional Steel Research*, 106, 220-233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.005>.

Perea, T. (2010). *Analytical and experimental study on slender concrete-filled steel tube columns and beam-columns* [Libro]. Atlanta, Ga.: Georgia Institute of Technology.

Posada, H. (2016). SteelApps. Resistencia seccional de una pieza tubular. *Eduacero*, Vol4. Número 4.

Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I. (2004). Behavior of Centrally Loaded Concrete - Filled Steel-Tube Short Columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130(2), pp. 180-188.

Scratch. (2016). *Scratch.mit.edu*. Retrieved 2 April 2016, from <https://scratch.mit.edu/about>.

Susantha, K., GE, H., & Usami, T. (2001). A capacity prediction procedure for concrete-filled steel columns. *Journal Of Earthquake Engineering*, 5(4), 483-520. <http://dx.doi.org/10.1080/13632460109350403>.

Tang G., Zhao B., Zhu H., Shen, X., (1982). Study on the fundamental structural behaviour of concrete filled steel tubular columns. *Journal of Building Structures*, Vol. 1, China (en chino), pp 13-31.

Twilt, L., Hass, R., Klingsch, W., Edwards, M., & Dutta, D. (2002) *Design guide for structural hollow section columns exposed to fire* [Libro].

W, Brownjohn. J., Pan, T. C., & Cheong, H. K. (1998). Dynamic response of Republic Plaza, Singapore. *The structural engineer*, Volumen 76.

ANEJO A – Link de descarga para la aplicación *CFT Optimal Design*.

La aplicación desarrollada para esta investigación (*CFT Optimal Design*), se puede descargar mediante el siguiente link ó código QR:



https://drive.google.com/file/d/0B_QMD7Wfujr3VHNod2Y5N00xWkE/view?usp=sharing

ANEJO B – Tablas de Resultados

Datos de entrada								EC4 Excel		AISC360-10 Excel		Johansson Excel	
N°	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm ²)	fyk (N/mm ²)	N (KN)	M (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	450	5	2000	30	235	2500	300	4469.33	254.95	4479.99	267.76	5223.58	260.61
2	450	7	2000	40	355	2800	350	6988.42	514.21	6840.61	535.61	8008.92	522.97
3	500	5	2000	30	460	3100	400	6881.38	586.74	6348.08	604.41	7739.87	589.1
4	500	7	2000	40	235	3400	450	7162.14	438.97	7197.64	462.74	8330.53	446.7
5	550	5	2000	30	355	3700	500	7222.89	567.5	6929.41	584.07	8186.37	575.26
6	550	7	2000	40	460	4000	550	10793.16	997.2	10314.4	1026.42	12110.92	1015.61
7	600	6	2000	30	235	4300	600	7718.73	551.1	7762.39	574.87	8954.97	559.06
8	600	8	2000	40	355	4600	650	11735.6	1058.14	11539.04	1103.39	13359	1077.84
9	650	6	2000	30	460	4900	700	11249.04	1207.28	10214.86	1234.88	12611.18	1227.7
10	650	8	2000	40	235	5200	750	11715.45	867.78	11840.85	913.6	13510.2	875.78
11	700	6	2000	30	355	5500	800	11473.13	1112.79	10932.38	1138.93	12961.8	1124.52
12	700	8	2000	40	460	5800	850	16754.86	1858.5	15883.53	1913.29	18722.05	1901.5
13	750	6	2000	30	235	6100	900	11420.77	885.95	11491.24	906.24	13036.45	900.09
14	750	8	2000	40	355	6400	950	17039.87	1709.06	16716	1754.74	19180.41	1721.04
15	800	7	2000	30	460	6700	1000	16679.28	2148.84	14937.63	2185.49	18656.24	2180.27
16	800	9	2000	40	235	7000	1050	17377.55	1488.47	17623.06	1556.05	19915.93	1517.89
17	850	7	2000	30	355	7300	1100	16700.48	1918.57	15820.75	1954.61	18825.43	1959.58
18	850	9	2000	40	460	7600	1150	24008.53	3127.67	22546.7	3199.41	26742.1	3158.4
19	900	10	2000	30	235	7900	1200	17877.33	2039.6	17919.96	2142.11	20894.32	2084.89
20	900	12	2000	40	355	8200	1250	26405.1	3571.24	25962.84	3723.94	30057.75	3637.73

Datos de entrada								EC4 App		AISC360-10 App		Johansson App	
Nº	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm2)	fyk (N/mm2)	N (KN)	M (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	450	5	2000	30	235	2500	300	4469.46	254.95	4480.1	267.76	5223.71	260.61
2	450	7	2000	40	355	2800	350	6988.69	514.22	6840.83	535.62	8009.19	522.98
3	500	5	2000	30	460	3100	400	6881.65	586.74	6348.32	604.41	7740.15	598.1
4	500	7	2000	40	235	3400	450	7162.34	438.98	7197.81	462.75	8330.73	446.7
5	550	5	2000	30	355	3700	500	7223.13	567.5	6929.61	584.07	8186.61	575.26
6	550	7	2000	40	460	4000	550	10793.58	997.22	10314.76	1026.42	12111.34	1015.61
7	600	6	2000	30	235	4300	600	7718.94	551.11	7762.57	574.87	8955.17	559.07
8	600	8	2000	40	355	4600	650	11736	1058.15	11539.39	1103.39	13359.4	1077.85
9	650	6	2000	30	460	4900	700	11249.46	1207.29	10215.23	1234.88	12611.61	1227.7
10	650	8	2000	40	235	5200	750	11715.73	867.78	11841.1	913.6	13510.48	875.78
11	700	6	2000	30	355	5500	800	11473.49	1112.8	10932.69	1138.93	12962.15	1124.53
12	700	8	2000	40	460	5800	850	16755.48	1858.5	15884.05	1913.29	18722.66	1901.5
13	750	6	2000	30	235	6100	900	11421.03	885.95	11491.46	906.25	13036.71	900.09
14	750	8	2000	40	355	6400	950	17040.37	1709.07	16717.07	1754.35	19180.92	1721.05
15	800	7	2000	30	460	6700	1000	16679.89	2148.85	14938.16	2185.5	18656.85	2180.27
16	800	9	2000	40	235	7000	1050	17377.95	1488.47	17623.4	1556.06	19916.34	1517.9
17	850	7	2000	30	355	7300	1100	16700.98	1918.57	15821.19	1954.61	18825.93	1959.59
18	850	9	2000	40	460	7600	1150	24009.36	3127.67	22547.42	3199.42	26742.94	3158.4
19	900	10	2000	30	235	7900	1200	17877.83	2039.61	17920.39	2142.12	20894.83	2084.89
20	900	12	2000	40	355	8200	1250	26406	3571.24	25963.62	3723.95	30058.65	3637.74

Datos de entrada								EC4		AISC360-10		Johansson	
N°	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm2)	fyk (N/mm2)	Ned (KN)	Med (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	350	5	2000	30	235	500	50	2923.25	149.41	2895.82	157.97	3472.1	153.23
2	385	5	2000	30	235	500	50	3428.69	182.85	3412.83	193.2	4048.85	188.8
3	350	5.5	2000	30	235	500	50	3021.56	162.4	2978.41	171.76	3608.07	167.56
4	350	5	2000	33	235	500	50	3104.83	150.48	3089.89	158.96	3664.11	155.3
5	350	5	2000	30	258.5	500	50	3033.99	163.13	2991.33	172.57	3582.85	167.44
6	650	7	2000	40	235	1000	100	11361.28	765.85	11536.87	797.42	12981.13	778.26
7	715	7	2000	40	235	1000	100	13473.51	932.33	13708.28	982.31	15291.53	959.57
8	650	7.7	2000	40	235	1000	100	11609.51	835.83	11751.84	877.08	13352.97	855.38
9	650	7	2000	44	235	1000	100	12208.45	767.78	12441.34	813.24	13856.88	790.19
10	650	7	2000	40	258.5	1000	100	11650.23	839.01	11766.55	872.15	13270.09	854.35
11	850	8	2000	40	355	5000	500	21100.22	2213.21	20523.72	2274.14	23589.72	2242.25
12	935	8	2000	40	355	5000	500	24880.43	2700.44	23918.14	2787.94	27668.4	2764.41
13	850	8.8	2000	40	355	5000	500	21690.8	2411.7	21248.49	2501.21	24376.53	2456.4
14	850	8	2000	44	355	5000	500	22556.99	2225.16	22012.67	2281.04	25088.94	2277.96
15	850	8	2000	40	390.5	5000	500	21753.47	2419.31	20787.34	2470.7	24242.97	2454.01
16	1000	10	1000	45	400	10000	1000	33446.87	4272.3	32187.62	4371.87	37141.08	4380.99
17	1100	10	1000	45	400	10000	1000	39393.35	5285.97	37363.59	5355.56	43532.39	5325.35
18	1000	11	1000	45	400	10000	1000	34424.38	4654.16	33433.54	4808.38	38407.76	4728.72
19	1000	10	1000	49.5	400	10000	1000	35709.76	4354.95	34473.34	4453.13	39467.77	4387.57
20	1000	10	1000	45	440	10000	1000	34528.66	4669.56	32569.65	4808.79	38222.88	4726.37

Datos de entrada						Experimental	EC4	AISC360-10	Johansson
Nº	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm2)	fyk (N/mm2)	Nult (KN)	Nmax (KN)	Nmax (KN)	Nmax (KN)
1	168.8	2.64	305	34.7	302	1219	847.71	831.34	987.76
2	48	3.50	192	33.2	304	273	158.57	142.79	180.35
3	113.6	3.20	336	42.7	355	1139	454.85	436.28	536.64
4	166	5.00	660	29.62	274	1975	599.54	570.09	695.18
5	210	2.50	630	26.56	237	1637	920.29	914.21	1089.42
6	200	3.00	600	46.8	304	2160	1413.06	1408.75	1615.8
7	106	3.00	278	43.21	299	848	478.64	459.49	562.36
8	200	3.00	600	46.8	304	2160	1413.06	1408.75	1615.8
9	133.1	4.50	397	42.7	324	1440	856.54	809.78	1000.5
10	219	7.00	1420	38.2	273	3070	1947.31	1852.92	2316.27
11	166	5.00	1040	44.11	288	1695	1195.41	1146.96	1408.64
12	108	4.00	756	36.3	338	785	574.18	534.43	668.89
13	138.6	3.31	418	50	332	1490	862.17	837.67	996.65
14	168.4	4.52	813	43.8	302	2233	1193.53	1149.54	1399.48
15	273	8.00	1100	40.28	307	5194	3170.98	3022.28	3727.08
16	240	10.00	1440	49.8	269	5135	2952.21	2806.58	3486
17	96	5.00	405	39.53	411	1122	663.94	604.22	750.32
18	114	3.30	850	37	291	834	513.87	489.3	608.26
19	100	0.52	200	37.4	244	396	226.25	214.85	246.88
20	120.9	5.53	1050	21.1	343	1010	731.1	658.07	842.26

Elementos CFT calculados para comparación de métodos y modelos																
Datos de entrada										EC4		EC4 Conf.	AISC360-10		Johansson	
Nº	d (mm)	t (mm)	l (mm)	fck (N/mm ²)	fyk (N/mm ²)	N (KN)	M (KNm)	e/d	δ	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)	Nmax (KN)	Mmax (KNm)
1	450	5	2000	30	235	3000	121.5	0.09	0.32	4469.46	254.95	4526.79	4480.1	267.76	5223.71	260.61
2	450	7	2000	40	355	3800	153.9	0.09	0.43	6988.69	514.22	7099.82	6840.83	535.62	8009.19	522.98
3	500	5	2000	30	460	4600	207	0.09	0.45	6881.65	586.74	7006.16	6348.32	604.41	7740.15	598.1
4	500	7	2000	40	235	5400	243	0.09	0.31	7162.34	438.98	7252.64	7197.81	462.75	8330.73	446.7
5	550	5	2000	30	355	6200	306.9	0.09	0.37	7223.13	567.5	7337.09	6929.61	584.07	8186.61	575.26
6	550	7	2000	40	460	7000	346.5	0.09	0.44	10793.58	997.22	10987.17	10314.76	1026.42	12111.34	1015.61
7	600	6	2000	30	235	7800	421.2	0.09	0.30	7718.94	551.11	7824.10	7762.57	574.87	8955.17	559.07
8	600	8	2000	40	355	8600	464.4	0.09	0.39	11736	1058.15	11934.77	11539.39	1103.39	13359.4	1077.85
9	650	6	2000	30	460	9400	549.9	0.09	0.43	11249.46	1207.29	11470.73	10215.23	1234.88	12611.61	1227.7
10	650	8	2000	40	235	10200	596.7	0.09	0.28	11715.73	867.78	11867.00	11841.1	913.6	13510.48	875.78
11	700	6	2000	30	355	11000	693	0.09	0.35	11473.49	1112.8	11666.21	10932.69	1138.93	12962.15	1124.53
12	700	8	2000	40	460	11800	743.4	0.09	0.42	16755.48	1858.5	17071.89	15884.05	1913.29	18722.66	1901.5
13	750	6	2000	30	235	12600	850.5	0.09	0.25	11421.03	885.95	11563.49	11491.46	906.25	13036.71	900.09
14	750	8	2000	40	355	13400	904.5	0.09	0.34	17040.37	1709.07	17313.68	16717.07	1754.35	19180.92	1721.05
15	800	7	2000	30	460	14200	1022.4	0.09	0.42	16679.89	2148.85	17023.32	14938.16	2185.5	18656.85	2180.27
16	800	9	2000	40	235	15000	1080	0.09	0.26	17377.95	1488.47	17603.38	17623.4	1556.06	19916.34	1517.9
17	850	7	2000	30	355	15800	1208.7	0.09	0.34	16700.98	1918.57	16991.97	15821.19	1954.61	18825.93	1959.59
18	850	9	2000	40	460	16600	1269.9	0.09	0.40	24009.36	3127.67	24474.30	22547.42	3199.42	26742.94	3158.4
19	900	10	2000	30	235	17400	1409.4	0.09	0.32	17877.83	2039.61	18176.16	17920.39	2142.12	20894.83	2084.89
20	900	12	2000	40	355	18200	1474.2	0.09	0.39	26406	3571.24	26923.76	25963.62	3723.95	30058.65	3637.74
21	350	5	2000	30	235	1500	42	0.09	0.38	2923.25	149.41	2961.23	2895.82	157.97	3472.1	153.23
22	385	5	2000	30	235	1500	46.2	0.09	0.36	3428.69	182.85	3473.34	3412.83	193.2	4048.85	188.8
23	350	5.5	2000	30	235	1500	42	0.09	0.40	3021.56	162.4	3063.40	2978.41	171.76	3608.07	167.56

24	350	5	2000	33	235	1500	42	0.09	0.36	3104.83	150.48	3142.04	3089.89	158.96	3664.11	155.3
25	350	5	2000	30	258.5	1500	42	0.09	0.40	3033.99	163.13	3075.27	2991.33	172.57	3582.85	167.44
26	650	7	2000	40	235	6000	312	0.09	0.25	11361.28	765.85	11493.72	11536.87	797.42	12981.13	778.26
27	715	7	2000	40	235	6000	343.2	0.09	0.24	13473.51	932.33	13624.59	13708.28	982.31	15291.53	959.57
28	650	7.7	2000	40	235	6000	312	0.09	0.27	11609.51	835.83	11755.15	11751.84	877.08	13352.97	855.38
29	650	7	2000	44	235	6000	312	0.09	0.24	12208.45	767.78	12339.26	12441.34	813.24	13856.88	790.19
30	650	7	2000	40	258.5	6000	312	0.09	0.27	11650.23	839.01	11795.32	11766.55	872.15	13270.09	854.35
31	850	8	2000	40	355	12000	816	0.09	0.31	21100.22	2213.21	21424.01	20523.72	2274.14	23589.72	2242.25
32	935	8	2000	40	355	12000	897.6	0.09	0.29	24880.43	2700.44	25247.50	23918.14	2787.94	27668.4	2764.41
33	850	8.8	2000	40	355	12000	816	0.09	0.33	21690.8	2411.7	22046.27	21248.49	2501.21	24376.53	2456.4
34	850	8	2000	44	355	12000	816	0.09	0.29	22556.99	2225.16	22877.94	22012.67	2281.04	25088.94	2277.96
35	850	8	2000	40	390.5	12000	816	0.09	0.33	21753.47	2419.31	22108.22	20787.34	2470.7	24242.97	2454.01
36	1000	10	1000	45	400	24000	1920	0.09	0.32	33446.87	4272.3	34078.93	32187.62	4371.87	37141.08	4380.99
37	1100	10	1000	45	400	24000	2112	0.09	0.30	39393.35	5285.97	40099.34	37363.59	5355.56	43532.39	5325.35
38	1000	11	1000	45	400	24000	1920	0.09	0.35	34424.38	4654.16	35116.80	33433.54	4808.38	38407.76	4728.72
39	1000	10	1000	49.5	400	24000	1920	0.09	0.30	35709.76	4354.95	36339.60	34473.34	4453.13	39467.77	4387.57
40	1000	10	1000	45	440	24000	1920	0.09	0.34	34528.66	4669.56	35222.76	32569.65	4808.79	38222.88	4726.37

ANEJO C – Diagramas de Interacción

